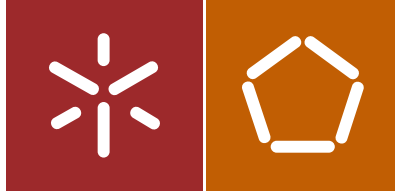


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago José Macedo de Figueiredo Paiva

Desenvolvimento de um sistema autónomo
de produção contínua de filamento para
Prototipagem Rápida



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago José Macedo de Figueiredo Paiva

Desenvolvimento de um sistema autónomo
de produção contínua de filamento para
Prototipagem Rápida

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José António Colaço Gomes Covas
e co-orientação do
Professor Doutor António José Vilela Pontes

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, em particular:

- À Universidade do Minho que durante este último ano, me disponibilizou todas as infra-estruturas e equipamentos necessários à realização deste projeto;
- Ao meu orientador, Professor José Covas, pela sugestão do tema, por todo o tempo despendido na passagem de conhecimentos, bem como pelas horas que passamos a encontrar soluções para os inúmeros problemas que foram surgindo no decorrer desta dissertação, não esquecendo, por fim a ajuda na revisão de textos;
- Ao meu co-orientador, Professor António Pontes, pelos vários conselhos dados durante o trabalho, pelas soluções e indicações para resolver situações ocorridas ao longo do trabalho e pela atenção disponibilizada sempre que lhe foi solicitada;
- Ao Professor, Fernando Duarte, pela disponibilidade e pelos conselhos dados para a resolução de questões relacionadas com o projeto;
- Ao DEP – Departamento de Engenharia de Polímeros e a todo o seu pessoal técnico, em especial ao João Paulo, que me ajudou com várias soluções técnicas para a realização deste trabalho;
- À empresa Neves e Neves – Metalomecânica, pela maquinagem dos componentes do equipamento desenvolvido e pela atenção disponibilizada ao longo dessa etapa do projeto.

E por fim, um especial agradecimento aos meus pais que me proporcionaram todas as ferramentas para poder frequentar este curso, à minha irmã Carlota e à minha esposa Joana por toda a paciência e ajuda que me prestaram ao longo destes 4 anos.

O meu muito obrigado a todos!

RESUMO

A presente dissertação visa expor e solucionar as lacunas existentes na área de Prototipagem Rápida de uso pessoal/doméstico e em particular na técnica FDM (Fused Deposition Modelling) aplicada em equipamentos de FDM *low cost*, atualmente impostas pelo uso de materiais plásticos específicos nesta tecnologia por parte dos fabricantes e o preço final praticado.

O objetivo desta dissertação inclui o projeto, o acompanhamento do fabrico e o arranque, de um equipamento, caracterizado por uma mini-extrusora de duplo-fuso contra rotativa que permita ultrapassar as fragilidades de uma FDM, através de um simples processo convencional de extrusão possibilitando o uso de um leque mais alargado de materiais poliméricos e reduzindo substancialmente os custos implícitos na obtenção de modelos físicos tridimensionais. De forma a concretizar o objetivo proposto, o desenvolvimento da extrusora foi idealizado tendo em conta a metodologia definida, a identificação dos requisitos necessários para a sua elaboração, e ainda a definição de algumas variáveis necessárias para efetuar o seu dimensionamento.

Durante a fase experimental foram identificadas algumas falhas, nomeadamente o amolecimento do material polimérico, devido à elevada temperatura registada na zona da tremonha, e ainda, a quebra do componente que promove o acoplamento do veio do motor à extrusora, devido à diferença de temperaturas verificada entre a cabeça de extrusão e a fieira do equipamento, causada pela colocação da posição dos cartuchos de aquecimento.

Termina-se esta dissertação com algumas sugestões, no sentido de minimizar os problemas encontrados e identificados no parágrafo anterior e determinar as potencialidades na utilização deste tipo de equipamento, de modo a torná-lo mais eficaz e ainda, para desenvolvimentos futuros possíveis.

Palavras-chave: Prototipagem Rápida, equipamentos de FDM *low cost*, extrusão, duplo-fuso contra-rotativa e equipamento eficaz.

ABSTRACT

This thesis aims to expose and address inadequacies in the area of personal/home Rapid Prototyping use and in particular the FDM technique (Fused Deposition Modeling) applied in *low cost* FDM machines currently imposed by the use of specific plastic materials for this technology manufacturers and the final price charged.

The aim of this work includes the design, manufacture and monitoring the startup of a device, characterized by a counter rotating twin screw mini-extruder that allows to overcome the weaknesses of the FDM, using a simple conventional extrusion process, enabling the use of a wider range of polymeric materials and substantially reducing the implicit costs of obtaining three-dimensional physical models. In order to achieve the proposed objective, the development of the extruder was designed taking into account the defined methodology, the identification of the requirements for its development, and even the definition of some variables needed to make its design.

During the experimental period, some defects have been identified, like softening of the polymeric material due to high temperature occurring at the hopper zone, including even breakage of the component that promotes the coupling of the motor shaft to the extruder, due to the difference of temperatures observed between the extrusion head and the die equipment, caused by the placement of the cartridge heaters.

This thesis ends up with some suggestions to minimize the problems found and identified in the preceding paragraph and determine the potential of using this type of equipment in order to make it more effective and future developments.

Key Words: Rapid Prototyping, low cost FDM machines, extrusion, twin screw counter rotating, effective equipment.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	17
Capítulo 1 - ESTADO-DA-ARTE.....	19
1.1. Prototipagem Rápida	19
1.2. FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>)	20
1.3. Extrusão	22
Capítulo 2 - METODOLOGIA	27
Capítulo 3 – DESENVOLVIMENTO DA EXTRUSORA.....	31
3.1 Seleção do equipamento de FDM <i>low cost</i>	31
3.2 Definição das especificações da extrusora	34
3.3 Dimensionamento.....	35
3.3.1 Parâmetros geométricos dos fusos	36
3.3.2 Definição da queda de pressão e do débito da extrusora	39
3.3.3 Binário do motor	41
3.4 Seleção e compra de elementos normalizados	42
3.5 Etapas para a construção da extrusora.....	50
3.6 Maquinagem dos componentes da extrusora	56
3.7 Apresentação da mini-extrusora.....	58
Capítulo 4 – FASE EXPERIMENTAL	61
4.1 Apresentação de resultados.....	61
4.2 Discussão de resultados	67
Capítulo 5 - CONCLUSÃO	69
Capítulo 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO I – Dimensões do motor de passo.....	77
ANEXO II – Desenhos técnicos dos componentes enviados para maquinagem	79
ANEXO III – Fichas técnicas dos materiais usados na maquinagem dos componentes.....	91
ANEXO IV – Fichas técnicas dos materiais poliméricos utilizados para fase experimental	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 – ESTADO-DA-ARTE

Figura 1 – Ilustração da técnica de FDM	20
Figura 2 – Bobine de material consumível.....	21
Figura 3 – Ilustração do “slicing” efetuado pelo <i>software</i>	21
Figura 4 – Ilustração do processo da plasticização na extrusora.....	22
Figura 5 – Secção transversal do cilindro de uma extrusora mono e duplo-fuso	23
Figura 6 – Tipos de engrenamento possíveis para extrusoras duplo-fuso.....	24
Figura 7 – Câmara em “C” presente no fuso das extrusoras duplo-fuso contra-rotativas	25

Capítulo 2 - METODOLOGIA

Figura 8 – Fluxograma da metodologia empregue no desenvolvimento da extrusora.....	28
--	----

Capítulo 3 - DESENVOLVIMENTO DA EXTRUSORA

Figura 9 – CB-Printer.....	34
Figura 10 – Ilustração dos parâmetros geométricos de um parafuso	36
Figura 11 – Secções do fuso de uma extrusora contra-rotativa.....	37
Figura 12 – Secções escolhidas para o fuso a utilizar na mini-extrusora	37
Figura 13 – Fuso da mini-extrusora desenhado em SolidWorks®.....	39
Figura 14 – Ilustração da secção transversal da mini-extrusora.....	39
Figura 15 – Ilustração dos elementos normalizados presentes numa extrusora convencional....	42
Figura 16 – Curva característica do motor seleccionado	43
Figura 17 – Conceito do sistema de transmissão de potência direto.....	44
Figura 18 – Caixa de potência com engrenagens e casquilhos	45
Figura 19 – (a) casquilho tipo “a” e (b) casquilho tipo “b”.....	45
Figura 20 – Resistências de banda circular habitualmente usadas nas extrusoras convencionais	46
Figura 21 – Tipo de resistência a usar na extrusora: (a) resistência do tipo placa flexível; (b) resistência do tipo cartucho.....	46
Figura 22 – Colocação e comprimento do furo para os cartuchos de aquecimento	47
Figura 23 – Cartucho do tipo N.....	47
Figura 24 – Posição dos cartuchos na mini-extrusora.....	48
Figura 25 – Primeira versão da mini-extrusora.....	50
Figura 26 – Tipo de geometria para a mini-extrusora: (a) circular; (b) retangular	51
Figura 27 – Solução do tipo “macho-fêmea”: (1) fêmea; (2) macho	51
Figura 28 – Equipamento constituído por diferentes materiais.....	52
Figura 29 – Sistema tipo “macho-fêmea” para os fusos e engrenagens.....	52

Figura 30 – Acoplamento veio do motor e engrenagens	52
Figura 31 – Evolução do desenho da mini-extrusora	53
Figura 32 – Ilustração da fieira (1) e cabeça de extrusão (2)	53
Figura 33 – Ilustração do acoplamento entre a cabeça de extrusão e fieira ao cilindro	54
Figura 34 – Colocação do termopar	54
Figura 35 – Tremonha da mini-extrusora.....	55
Figura 36 – Versão final da mini-extrusora	55
Figura 37 – Ilustração do protótipo final da mini-extrusora	55
Figura 38 – Colocação do protótipo da mini-extrusora no equipamento de FDM low cost	56
Figura 39 – Componentes constituintes da mini-extrusora que seguiram para maquinagem	56
Figura 40 – Mini-extrusora (1).....	58
Figura 41 – Mini-extrusora (2).....	58
Figura 42 – Mini-extrusora (3).....	58
Figura 43 – Fusos da mini-extrusora.....	58
Figura 44 – Sistema de transmissão de potência presente na caixa de potência	59
Figura 45 – Mini-extrusora comparada com moeda de 1€.....	59
Figura 46 – Medida do comprimento da mini-extrusora.....	59
Figura 47 – Ilustração da modularidade da mini-extrusora (1) e (2).....	60
Figura 48 – Figura ilustrativa da alimentação da mini-extrusora.....	60

Capítulo 4 - FASE EXPERIMENTAL

Figura 49 – Mini-extrusora a extrudir	61
Figura 50 – Situação sem arrefecimento, temperatura 200°C e cartuchos totalmente inseridos .	63
Figura 51 - Situação sem arrefecimento, temperatura 200°C e cartuchos fora 10mm	63
Figura 52 - Situação com arrefecimento, temperatura 200°C e cartuchos totalmente inseridos .	64
Figura 53 - Colocação da ventoinha para arrefecimento da tremonha e zona de alimentação....	64
Figura 54 – Vista posterior dos fusos da mini-extrusora.....	66
Figura 55 – Vista inferior dos fusos da mini-extrusora.....	66
Figura 56 – Vista frontal dos fusos da mini-extrusora	66

Capítulo 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Figura 57 – Local da quebra.....	67
Figura 58 – Localização do módulo em cerâmica na zona da alimentação	71
Figura 59 – Fieira preconizada no conceito inicial.....	71
Figura 60 – “Nova” fieira a maquinar.....	71

ÍNDICE DE TABELAS

Capítulo 1 – ESTADO-DA-ARTE

Tabela 1 - Características das extrusoras monofuso e duplo fuso..... 23

Tabela 2 - Comparação entre extrusoras de duplo-fuso co-rotativas e contra-rotativas 25

Capítulo 2 - METODOLOGIA

Tabela 3 - Timeline das etapas a realizar durante o desenvolvimento da dissertação..... 29

Capítulo 3 - DESENVOLVIMENTO DA EXTRUSORA

Tabela 4 - Pesquisa efetuada dos vários modelos de equipamentos FDM low cost 32

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos vários modelos analisados 33

Tabela 6 - Catalogação dos materiais existentes na Universidade 36

Tabela 7 - Escolha das secções utilizadas nos fusos da mini-extrusora 38

Tabela 8 - Escolha das dimensões gerais de cada módulo em [mm] 40

Tabela 9 - ΔP total do sistema..... 41

Tabela 10 - Modelos disponíveis de cartuchos de aquecimento da empresa Omega® 47

Tabela 11 - Gama de temperaturas dos termopares disponíveis no mercado..... 49

Tabela 12 - Tipo, dimensões e quantidades de parafusos de aperto utilizados na extrusora..... 50

Capítulo 4 - FASE EXPERIMENTAL

Tabela 13 - Tabela com programa de experiências a realizar 62

Capítulo 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tabela 14 - Vantagens e desvantagens das soluções..... 72

INTRODUÇÃO

Um dos temas mais falados e discutidos nos dias de hoje é a Prototipagem Rápida vulgarmente conhecida por Impressão 3D. Esta técnica de fabrico é caracterizada pela impressão de objetos sólidos tridimensionais, a partir de um ficheiro digital. A produção destes objetos pode ser conseguida através de processos aditivos de materiais, ou seja, o objeto é criado através da deposição do material em várias camadas, sobrepostas umas às outras, até se alcançar a forma final.

Esta é uma área que tem vindo a crescer desde 2011, no que diz respeito ao processo em si e aos materiais utilizados, pois é cada vez maior a oferta de mercado para a escolha destes. Inseridos neste leque estão os equipamentos que permitem produzir objetos físicos tridimensionais, conhecidos como equipamentos FDM (*Fused Deposition Modeling*) *low cost*. Na FDM de materiais plásticos é utilizado materiais poliméricos em forma de filamento, previamente extrudidos e enrolados em bobines, disponibilizados pelos fabricantes e outros agentes que se especializaram no fornecimento deste tipo de consumíveis. Na génese deste projeto, teve-se em consideração não só o fator limitativo do uso de materiais próprios para a FDM usados atualmente, mas também, o custo elevado da matéria-prima praticado pelos fabricantes. Em média, 1 kg deste tipo de consumível apresenta um custo aproximado de 40€ para materiais ditos convencionais, PLA e ABS (polímeros mais utilizados nesta tecnologia), até preços entre os 50€-60€ para outro tipo de materiais poliméricos. [1]

Atendendo ao panorama descrito, este estudo propõe desenvolver um equipamento que processe um leque alargado de material polimérico na forma de grânulo ou pó, e que de certa forma produza um filamento de material polimérico fundido, com um diâmetro constante, semelhante ao usado nas máquinas de FDM, para alimentação das mesmas. Equipamento, representado por uma extrusora convencional de material polimérico, adaptada em termos de dimensões e características às FDM's *low cost*, apresentando como principais vantagens, a possibilidade de usar qualquer tipo de material polimérico na sua forma “virgem”, na alimentação do equipamento de FDM, com um custo médio final de aproximadamente 4€ a 5€ por kg. [2]

A presente dissertação encontra-se segmentada em cinco capítulos. No primeiro capítulo é enquadrada a temática do projeto, seguida do levantamento do estado-da-arte, onde se apresentam as características das técnicas de prototipagem rápida em geral e em particular, da técnica FDM, que é objeto de estudo neste trabalho. É também feita uma descrição da técnica de extrusão que é a base para o desenvolvimento da mini-extrusora.

No capítulo dois, determinam-se os requisitos necessários para efetuar o seu desenvolvimento, e apresentam-se, através de um fluxograma, as etapas preconizadas para esse

fim. Termina-se com a apresentação de uma tabela, onde se mostra o tempo utilizado para a realização de todas as etapas.

No capítulo três, dá-se início ao desenvolvimento da extrusora. Começa-se por apresentar todos os passos que levaram à aferição do equipamento de FDM *low cost* que melhor serviu para o propósito deste estudo, assim como se procedeu à definição das especificações para o desenvolvimento do equipamento. O dimensionamento dos componentes constituintes do equipamento, a aquisição de elementos normalizados presentes no mercado, a escolha das soluções construtivas, a evolução do *design* da mini-extrusora e a maquinagem dos seus componentes, foram as etapas realizadas à posteriori. Este capítulo termina com a apresentação da mini-extrusora e suas características.

Após a definição dos pressupostos acima mencionados, no capítulo quatro é realizada uma etapa experimental, onde se segue um conjunto planeado de experiências de extrusão de três materiais diferentes, a três velocidades de rotação dos fusos, também diferentes, e a três temperaturas de acordo com as temperaturas de processamento do material a extrudir, de modo a avaliar a eficiência da mini-extrusora. São apresentados e discutidos neste capítulo, os resultados obtidos durante a execução das experiências efetuadas. Ainda dentro deste capítulo identificam-se e explicam-se alguns problemas encontrados durante o arranque do sistema, como o amolecimento do material polimérico e a quebra do componente que promove o acoplamento entre o veio do motor e da extrusora.

Termina-se esta dissertação com os capítulos cinco e seis, onde se apresentam as conclusões do trabalho, assim como algumas sugestões para melhorar a eficiência do equipamento tendo em visto a sua utilização no futuro.

Capítulo 1 - ESTADO-DA-ARTE

A concretização deste projeto pressupõe o domínio e a interligação de várias áreas, nomeadamente, o conhecimento sobre prototipagem rápida, técnica de FDM e extrusão.

1.1. Prototipagem Rápida

A prototipagem rápida é uma técnica avançada e automatizada para a fabricação de modelos físicos – protótipos – a partir de um ficheiro CAD (*Computer-Aided Design*) tridimensional. A grande vantagem desta técnica é a fabricação de modelos físicos num curto espaço de tempo, apenas dependendo do tamanho da peça e da capacidade da máquina que vai gerar esse modelo. Esta técnica veio revolucionar o processo de desenvolvimento de produtos, e apresenta as seguintes vantagens:

- Visualização e acesso ao produto;
- Verificação do produto;
- Otimização do produto, de modo a obter a máxima qualidade.

Integram esta tecnologia os processos aditivos e subtrativos de manufatura. O primeiro método, tal como o nome indica, caracteriza-se pela adição de material em camadas até à formação do modelo físico final pretendido. Por outro lado, o segundo método caracteriza-se pela subtração de material, isto é, parte-se de um bloco de material, procedendo progressivamente à remoção deste até à obtenção do modelo físico final. A grande desvantagem deste último método relativamente ao primeiro é o elevado desperdício de material. Para contrariar este senão, recorreram-se a processos de adição de camadas sucessivas de material - partindo-se sempre de sequências bidimensionais - de forma a produzir o modelo físico tridimensional, reduzindo e/ou anulando dessa forma o desperdício. O método mais recorrente foi, até uma determinada altura, o de subtração de material, no entanto, hoje em dia, com o avanço da tecnologia, os métodos aditivos começam a surgir como os mais procurados por parte dos fabricantes deste tipo de tecnologia. [3]

Chegando à conclusão que o método aditivo apresentava enormes vantagens, começaram-se a desenvolver equipamentos que utilizassem o sistema de adição de material. Uma das técnicas utilizada nesses processos é a FDM. Aquando do surgimento desta técnica, os equipamentos utilizados estavam maioritariamente orientados para a indústria, apresentando dimensões *standard* de 250x250x200 mm³ e máximas de 1800x600x450 mm³; uma precisão *standard* de 0,2mm por 100mm; um custo por máquina de 125.000€ ou superior (exceto modelos concetuais);

um custo de material superior a 75€/kg, e uma produtividade *standard* inferior a 20 cm³/h e específica superior a 1000 cm³/h. [4]

O resultado destas características é o despertar para um novo nicho de mercado: o desenvolvimento de equipamentos de FDM *low cost*. Estas máquinas caracterizam-se por apresentar dimensões, precisão, custo, tanto da máquina como de materiais bastante mais reduzidos, apresentando no entanto valores de produtividade semelhantes aos verificados anteriormente.

1.2. FDM (*Fused Deposition Modeling*)

A técnica de deposição de material utilizada neste trabalho e que tem vindo a ser desenvolvida desde 1988 é a FDM, em português - Modelação por Deposição de Material Fundido - introduzida e comercializada na indústria pela empresa Stratsys®, EUA. [5] Na Figura 1 mostra-se uma ilustração do processo que ocorre durante a FDM, assim como os componentes constituintes de um equipamento, neste caso de dupla extrusão.

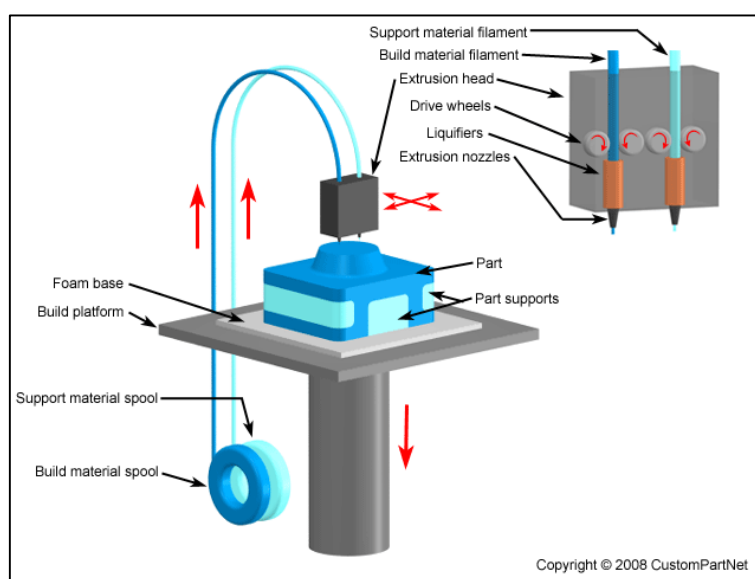


Figura 1 – Ilustração da técnica de FDM [6]

Através da Figura 1 é possível visualizar os consumíveis utilizados para alimentação da FDM. Neste caso, como mencionado anteriormente, estão presentes duas bobines de material, uma com um material de construção, geralmente ABS (polímero convencional mais usado nesta tecnologia [7]), e outra bobine com material de suporte (em geral PLA). No entanto, o trabalho a realizar ao longo da dissertação prende-se simplesmente com o uso de um material. Os consumíveis utilizados por estes equipamentos são filamentos de plástico, enrolados e vendidos em forma de bobine, como se pode verificar pela Figura 2.



Figura 2 – Bobine de material consumível [8]

Para que se perceba o funcionamento da FDM e consequente produção de objetos tridimensionais físicos a partir de um ficheiro digital, de seguida enumeram-se as etapas preconizadas ao longo deste processo:

1. Importação de um ficheiro digital, desenhado previamente em programas CAD, com extensão de tipo de ficheiro “.stl” de modo a ser reconhecido pelo *software* de impressão, onde é realizado, camada a camada, o “*Slicing*” ou “fatiamento” do objeto. O *software* calcula as secções e realiza o “slicing” da peça desenhada. Esse “slicing” será tanto mais rigoroso quantas mais camadas forem executadas. Na Figura 3 é ilustrado o “slicing” efetuado pelo *software* ao desenho digital previamente realizado em 3D.

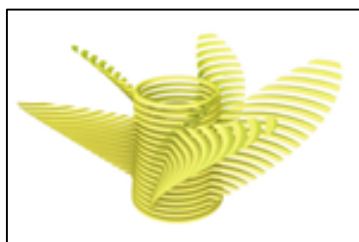


Figura 3 – Ilustração do “slicing” efetuado pelo *software* [9]

Posteriormente, o *software* fornece instruções para a construção do modelo tridimensional.

2. Pré-aquecimento do extrusor tendo em conta as propriedades térmicas do material;
3. Alimentação mecânica do extrusor através dos filamentos cilíndricos de material plástico, por norma com diâmetro entre 1,5 e 3 mm, armazenados em bobines;
4. Aquecimento do material no interior do extrusor após a entrada destes filamentos, resultando na sua fusão;
5. Deposição da primeira camada na plataforma onde assenta o modelo a produzir;
6. Repetição da alínea anterior até que todo o sólido fique impresso, o que pode demorar vários minutos e/ou horas, dependendo do volume de impressão. [10]

A explicitação da prototipagem rápida, e nomeadamente a FDM tornam-se pertinentes na medida em que permitem perceber como as suas características influenciam na escolha das soluções a adotar ao equipamento a desenvolver, de forma a efetuar a melhor abordagem na projeção do conceito do projeto.

1.3. Extrusão

A extrusão de plásticos é um processo que consiste em fazer passar um material polimérico, desde o estado sólido até ao estado fundido, sob a ação da pressão através de um orifício com forma mais ou menos complexa - fiação -, de modo a que esse material adquira uma secção transversal igual à do orifício. É, normalmente, um processo contínuo, sendo usado para a produção de perfis, filmes plásticos, folhas plásticas, filamento, etc.

Uma extrusora para ser eficaz deve ser capaz de:

- Aceitar e fazer avançar com facilidade matéria-prima com diferentes formas físicas;
- Fundir eficazmente o polímero;
- Homogeneizar o fundido, tanto em temperatura como em composição volúmica;
- Ter boa capacidade de gerar pressão;
- Controlar com precisão as condições operatórias impostas (sistema eficaz) e fornecer indicações, através de sensores, sobre as condições em que o polímero está a ser processado.

Na Figura 4 apresenta-se uma ilustração do processo de plasticização de um polímero numa extrusora convencional.

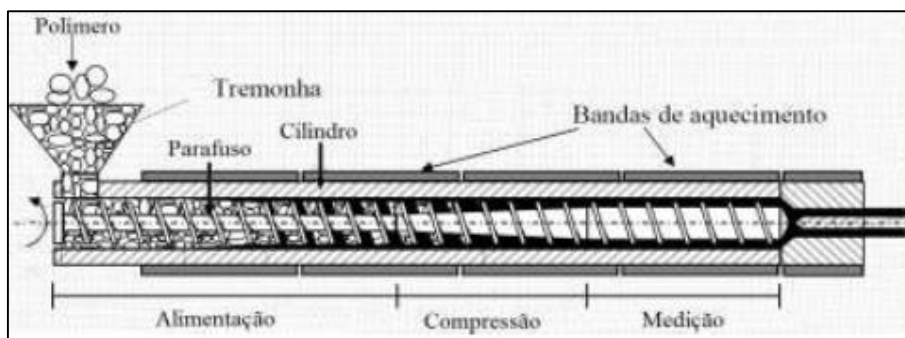


Figura 4 – Ilustração do processo da plasticização na extrusora

O processo de plasticização envolve três etapas sequenciais, a saber:

1. Transporte de sólidos, que engloba o fluxo gravítico na tremonha e o avanço do material nas primeiras espiras do parafuso;
2. Fusão, de uma forma ordenada, do material polimérico do estado sólido para o estado fundido à medida que avança no parafuso;
3. Mistura e bombagem do fundido para a cabeça de extrusão.

Na indústria dos plásticos são comercializados diversos tipos de extrusoras, entre as quais se distinguem, pela sua importância prática no processamento de polímeros, as extrusoras mono-fuso e as extrusoras duplo-fuso. Estas abarcam um conjunto de características próprias de cada

equipamento, representadas pela Figura 5 que ilustra a secção transversal do cilindro presente em cada um destas máquinas.

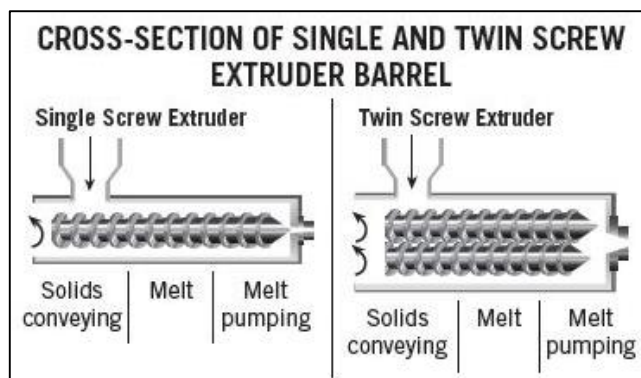


Figura 5 – Secção transversal do cilindro de uma extrusora mono e duplo-fuso [11]

As extrusoras mono-fuso são as máquinas mais difundidas na indústria, uma vez que contêm um conjunto de características muito próprias e simples. Porém, as extrusoras de duplo-fuso abarcam um conjunto significativo de máquinas mais complexas, com parafusos paralelos entre si, ou não, e eventualmente com um grau de engrenagem também distinto, originando a construção de um sistema de transmissão de potência adequado para este tipo de máquinas, de acordo com o pretendido.

Em termos práticos existem várias diferenças entre este tipo de máquinas, estando estas enunciadas pela tabela que se segue (Tabela 1). [12]

Tabela 1 - Características das extrusoras monofuso e duplo fuso

Mono-fuso	Duplo-fuso
Transporte de sólidos fortemente dependente das propriedades de atrito.	Transporte de sólidos pouco dependente das propriedades de atrito.
O material sólido move-se em bloco, enquanto o fundido progride em hélice.	O material avança axialmente dentro de câmaras em forma de C.
O parafuso está rodeado por polímero.	O escoamento na folga da calandra afasta os parafusos e empurra-os contra o cilindro.
Velocidades de rotação podem ser elevadas.	Velocidades de rotação baixas a moderadas.
Qualidade de mistura regular, podendo ser melhorada com dispositivos de mistura.	Boa qualidade de mistura (distribuição estreita de tempos de residência).
Boa capacidade de gerar pressão.	Excelente capacidade de gerar pressão.
Grande sensibilidade à variação da resistência da cabeça.	Pequena sensibilidade à variação da resistência da cabeça.
Dissipação viscosa importante.	Dissipação viscosa menos importante.

Os parafusos existentes em cada um deste tipo de máquinas apresentam três zonas geométricas distintas no seu comprimento total:

- 1) Zona de alimentação;
- 2) Zona de compressão;
- 3) Zona de medição.

Estas zonas representam, respetivamente, os pontos 1, 2 e 3, das etapas da plasticização referenciados anteriormente neste subcapítulo.

Como o próprio nome indica, as extrusoras de duplo-fuso apresentam dois parafusos, que rodam à mesma velocidade, em sentido contrário (contra-rotativo) ou no mesmo sentido (co-rotativo), dentro de um cilindro que apresenta uma secção transversal com a forma aproximada de um oito, como exemplificado pela Figura 6, onde se visualizam os diferentes engrenamentos e comportamento dos fusos nestas máquinas. [13]

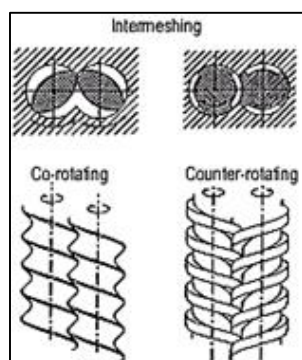


Figura 6 – Tipos de engrenamento possíveis para extrusoras duplo-fuso [14]

Outro aspeto prende-se com o facto de ao serem usados parafusos cilíndricos a compressão é geralmente promovida por variação do passo, do número de entradas da rosca, ou da espessura do filete, enquanto nos parafusos cónicos a compressão é inerente à redução do diâmetro interno do parafuso nas extrusoras de duplo-fuso.

De seguida efetua-se uma comparação entre extrusoras de duplo-fuso co-rotativas e contra-rotativas de forma a avaliar as vantagens de cada uma destas máquinas. Estas diferem em termos de construção e *design*, e ambas apresentam características próprias de cada tipo de engrenamento, como se pode analisar pela Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação entre extrusoras de duplo-fuso co-rotativas e contra-rotativas

Duplo-fuso co-rotativa	Duplo-fuso contra-rotativa
A mistura de material de um parafuso com o outro é maior;	A mistura de material de um parafuso com o outro é menor;
Menor capacidade de gerar pressão;	Maior capacidade de gerar pressão;
Eventuais flutuações na resistência da cabeça de extrusão causadas por oscilações de temperatura ou mesmo por mudança da fieira alteram o débito do composto;	Eventuais flutuações na resistência da cabeça de extrusão causadas por oscilações de temperatura ou mesmo por mudança da fieira, não alteram significativamente o débito do composto;
Tipo de máquinas escolhido para composição, mistura, de volatilização e reações químicas.	Tipo de máquinas escolhido para extrusão de perfis.

Apesar do mecanismo de transporte de material neste tipo de máquinas ser semelhante, existem algumas diferenças no que diz respeito ao escoamento e efeitos de mistura. A geometria engrenada presente nos fusos destas máquinas impede que o material progrida ao longo do canal helicoidal de cada um dos fusos e a mistura presente é surpreendentemente eficaz, apesar do relativo isolamento do polímero em cada câmara e da distribuição estreita de tempos de residência nos dois parafusos destas máquinas, ao contrário do que acontece nas extrusoras co-rotativas. [15] [16] [17]

Assim sendo, o material proveniente da tremonha cai por ação da gravidade, através da abertura para alimentação do cilindro e, enche parcialmente as câmaras em forma de “C” onde se realiza a mistura. Na Figura 7, representa-se a câmara em “C” do fuso de uma extrusora de duplo-fuso contra-rotativa.

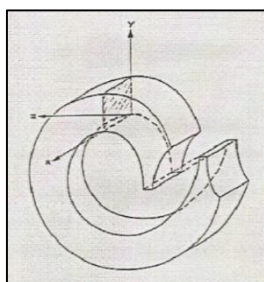


Figura 7 – Câmara em “C” presente no fuso das extrusoras duplo-fuso contra-rotativas

A presente dissertação procurou ultrapassar algumas das lacunas referidas anteriormente, intrínsecas aos temas abordados durante o levantamento do estado-da-arte. Esta análise permitiu retirar algumas ilações sobre o tipo de equipamento a desenvolver e a dimensionar.

Capítulo 2 - METODOLOGIA

Para dar início ao projeto, foi necessário definir os requisitos indispensáveis para a concretização do objetivo proposto. Seguidamente explicam-se e enumeram-se esses requisitos:

1. Realizar uma pesquisa de modelos de equipamentos de FDM *low cost* de vários fabricantes, verificar as características de cada modelo, selecionar e adquirir o modelo mais adequado para efeitos de experiência: A oferta de mercado relativamente aos modelos de equipamentos de FDM é bastante abrangente, logo, é necessário ter alguma prudência no que se refere às características que cada um destes modelos apresenta. Questões como a qualidade do protótipo, tolerâncias, velocidades de deposição e de movimentos, dimensão máxima do protótipo e, mono ou dupla extrusão, são questões que se devem analisar na escolha do equipamento a adquirir. Deve-se igualmente ter em conta as características que melhor se adequam ao propósito, isto para que se possa escolher o exemplar que melhor se adequa à realização dos testes necessários para proceder à alimentação do equipamento. Numa fase posterior a este projeto, poder-se-á estudar uma forma universal de aplicar o conceito a todos os modelos de equipamentos de FDM *low cost* existentes no mercado. Devido a todos estes fatores, é necessário fazer uma análise de mercado minuciosa, no sentido de verificar qual o equipamento que reúne o maior número de pontos fortes para o pretendido neste projeto;

2. Construir uma extrusora pequena e leve: É importante que a extrusora a desenvolver possua um tamanho adequado à estrutura do equipamento de FDM existentes no mercado, ou seja, de dimensões relativamente reduzidas e que seja um equipamento leve, para que a deslocação e colocação da extrusora se possa adaptar à estrutura do equipamento;

3. Realizar uma etapa experimental para avaliar a eficácia da extrusora: Após construção da extrusora é indispensável avaliar o comportamento da mesma através da análise do débito da máquina ao longo do tempo. Esta deve ser eficaz para que o processo de extrusão decorra de uma forma suave e precisa, e no final se obtenha um filamento homogêneo de diâmetro adequado e constante para poder ser utilizado no mecanismo do extrusor convencional dos equipamentos FDM sem que ocorram defeitos.

De acordo com os requisitos mencionados anteriormente foi definido que o equipamento a desenvolver seria uma extrusora de dimensões muito reduzidas, e de duplo-fuso contra-rotativa. Foi feita esta escolha porque, primeiro, pretende-se projetar um equipamento de tamanho ajustado às dimensões *standard* de um equipamento de FDM *low cost*, e assim poder de certa forma acoplá-lo à sua estrutura sem prejudicar o correto funcionamento da mesma. Segundo, porque este tipo

de extrusoras, como se pode confirmar através do levantamento do estado-da-arte, apresenta grandes vantagens, tais como:

- Boa capacidade de mistura, devido ao comprimento do canal, tendo em conta as dimensões reduzidas da extrusora;
- Excelente capacidade de gerar pressão: é indispensável que se consiga gerar pressão, ao longo do comprimento do canal, de acordo com as dimensões da extrusora;
- Velocidade de rotação baixa;
- Dissipação viscosa, sem influência no processo de plasticização, no caso de extrusoras de duplo-fuso. No caso projetado na presente dissertação, é imperativo que a plasticização não sofra influências indiretas, como o aumento da temperatura na homogeneização do fundido ao longo do comprimento total do canal de escoamento, e assim torne impossível o controlo das variáveis da extrusora;
- Variações de temperatura ou mesmo mudanças de feitura, neste tipo de máquinas, não alteram significativamente o débito do conjunto.

Depois de consideradas todas estas situações, apresenta-se um fluxograma na Figura 8 onde se podem verificar as etapas metodológicas empregues no desenvolvimento do equipamento proposto no objetivo desta dissertação.

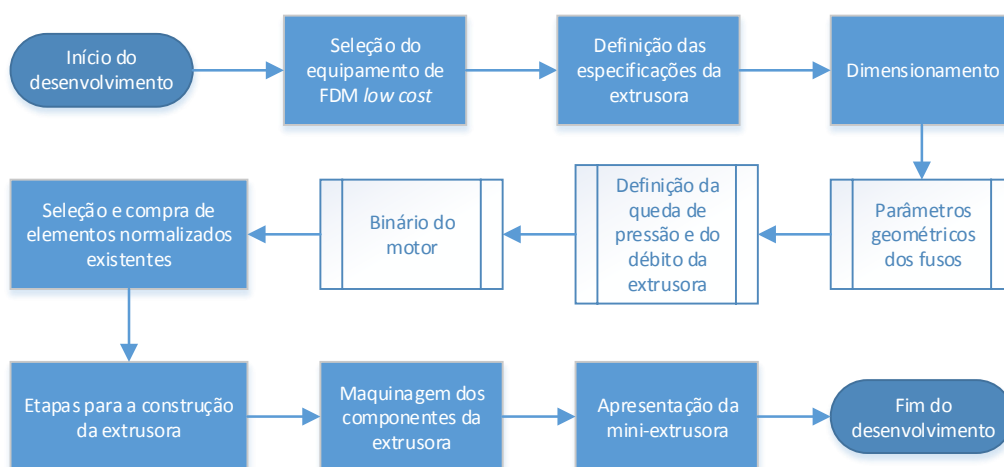


Figura 8 – Fluxograma da metodologia empregue no desenvolvimento da extrusora

Na Tabela 3 é possível verificar os *timings* ocupados pelas etapas que ocorreram durante a realização deste trabalho.

Tabela 3 - Timeline das etapas a realizar durante o desenvolvimento da dissertação

1						5															
ID		Modo de Tarefa	Nome da Tarefa	Duração	Início	Conclusão	Set	Out	Nov	Dez	2014	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
1			Seleção do equipamento de FDM low cost	21 dis	Ter 01/10/13	Seg 28/10/13															
2			Definição das especificações da extrusora	5 dis	Seg 28/10/13	Sex 01/11/13															
3			Dimensionamento	100 dis	Dom 03/11/13	Qui 20/03/14															
4			Seleção e compra de elementos normalizados	10 dis	Seg 17/03/14	Sex 28/03/14															
5			Etapas para a construção da extrusora	55 dis	Seg 31/03/14	Sex 13/06/14															
6			Maquinagem dos componentes da extrusora	34 dis	Seg 16/06/14	Qui 31/07/14															
7			Apresentação da mini-extrusora	5 dis	Seg 01/09/14	Sex 05/09/14															
8			Fase experimental	10 dis	Seg 08/09/14	Sex 19/09/14															

Após a execução das etapas verificadas na Figura 8, é expectável que a máquina de FDM consiga efetuar um processo de deposição de material, semelhante ao processo original verificado nos equipamentos de FDM, sendo, no entanto, alimentados pelos filamentos poliméricos produzidos na extrusora, de forma constante e correta, com o intuito de se obterem objetos físicos tridimensionais num curto espaço de tempo.

Capítulo 3 – DESENVOLVIMENTO DA EXTRUSORA

Neste capítulo expõe-se todo o trabalho efetuado ao longo do projeto na seleção e dimensionamento dos diversos elementos constituintes da extrusora de acordo com o fluxograma apresentado no capítulo anterior na Figura 8.

3.1 Seleção do equipamento de FDM *low cost*

Como referido anteriormente, deve ser realizada uma pesquisa exaustiva dos equipamentos de FDM existentes no mercado, de modo a avaliar que modelo melhor se adequa à realização dos testes para o desenvolvimento da extrusora. No final dessa pesquisa, foi possível sistematizar toda a informação retirada das principais características de vários modelos de equipamento de FDM, na Tabela 4.

Tabela 4 - Pesquisa efetuada dos vários modelos de equipamentos FDM *low cost*

	RepRap Ord Bot Hadron	Felix 2.0 Fully Assembled	CB Printer	BeeVeryFi rst	MakerBot 2	Makerbot 2X	Leapfrog Creatr	AmCubed	CubeX 3D Printer
Dimensões (LxPxA) [mm]	515x515x598	450x500x530	440x495x465	400x400x140	490x420x380	490x420x531	500x600x500	470x560	515x515x598
Peso [kg]	8	6,7	9,1	10	11,5	12,6	32	-	37
Máx. impr. [mm]	195 X 195 X 150	255x205x235	200x200x180	190x135x125	285x153x155	246x152x155	230x270x200	280x230x220	230x265x240
Qualidade (alta) [μ]	-	50	100	100	100	100	50	100	100
Qualidade (standard) [μ]	-	-	200	-	200	200	-	-	-
Qualidade (baixa) [μ]	-	-	300	300	300	300	350	-	-
Tolerância impr. (x,y) [μ]	-	-	10	-	11	11	-	-	20
Tolerância impr. (z) [μ]	-	-	2,5	-	2,5	2,5	5	-	5
Diâm. filam. [mm]	-	1,75	3	-	1,75	1,75	1,75	-	1,75
Diâmetro bico [mm]	-	0,35	0,3	-	0,4	0,4	0,35	-	-
T máx da extrusora [°C]	Programável	Programável	240 - 270	250	-	-	-	-	280
Velocidade de deposição [mm/s]	Programável	-	-	-	até 150	até 150	até 350	-	-
Velocidade extrusão [mm/s]	-	-	-	-	até 90	até 90	até 60	-	15
Mesa de impressão	-	Aquecida	Aquecida	PC	Acrílica	Aquecida / Alumínio	Aquecida	-	-
Movimento (cabeça)	x / z	x	x / z	x	x / y	x / y	x / y	x / y	x / y
Movimento (mesa)	y	y / z	y	y / z	z	z	Z	z	z
Consumível	PLA / ABS	PLA	ABS	PLA	PLA/ ABS/ PVA/ filamento solúvel/ flexível	PLA/ ABS/ PVA/ filamento solúvel/ flexível	PLA / PVA / ABS	ABS/ PLA/ PC/ PVA/ Nylon/ Polímero c/ madeira ou pedra	PLA/ ABS/ PLA solúvel
Material (estrutura)	Alumínio	Alumínio	Alumínio	Metal / Acrílico	Aço / Acrílico	Aço/Painéis em PVC	Metal	Metal / Acrílico	Metal/Plástico
Software	Open-source	Open-source	Slic3r, Pronterface	Beesoft	MakerWare	MakerWare	Repetier	-	Cubex Software
Preço	849€	1500€	1640€	2 220 €	2440€	3158€	1 815 €	3 500 €	2 849 €

Tendo por base a pesquisa efetuada, de seguida identificam-se os fatores que mais preponderância terão na escolha do modelo de equipamento de FDM *low cost* a comprar:

1. Dimensão máxima de deposição;
2. Velocidade de deposição de material;
3. Movimento do extrusor e da plataforma (para saber sob que eixos se deslocam);
4. Material constituinte;
5. Robustez;
6. Qualidade e tolerância de impressão que estas máquinas suportam;
7. Número de extrusores;
8. Open-source ou *software* próprio;
9. Origem do fabricante;
10. Preço.

Efetuiu-se também uma comparação em termos de vantagens/desvantagens dos diferentes modelos de equipamentos procurados, apresentada de seguida na Tabela 5.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens dos vários modelos analisados

	Makerbot 2X	Leapfrog Creatr	Amcubed	CubeX Duo 3D Printer	Witbox Helios 2.0
Vantagens	Robusta Fiabilidade Suporte Estrutura fechada Quantidade de materiais disponíveis Software amigável e intuitivo Mesa aquecida Alta precisão LCD Disponibilidade imediata	Robusta Preço Acesso aos componentes Software amigável e intuitivo Bom volume de impressão Mesa aquecida Alta precisão Boas velocidades de impr e mov Estrutura fechada	Portuguesa Quantidade/variedade de materiais LCD	Robusta Aposta de mercado Estrutura fechada LCD	-
Desvantagens	Software fechado? Ou ReplicatorG? Dificuldade em aceder aos componentes	Pesada 32 Kg Disponibilidade 2-4 semanas	Software? Dificuldade em aceder aos componentes Preço	Software fechado	Disponibilidade

	Ord Bot Hadron	Felix 2.0	CB Printer	BeeVeryFirst	Ultimaker	Makerbot 2
Vantagens	Barata Modular Open-source	Não necessita montagem Preço Open-source Utilização amigável do software Maior volume de impressão Mesa aquecida Modular	Mesa aquecida Disponibilidade imediata Possibilidade de adicionar outro extrusor em kit Software open-source Preço Acesso aos componentes Suporte	Portuguesa Estrutura fechada	Adicionar 2º extrusor Preço Estrutura fechada Disponibilidade imediata	Robusta Fiabilidade Suporte Aposta de mercado Estrutura fechada Quantidade de materiais disponíveis Alta precisão LCD Disponibilidade imediata
Desvantagens	Necessidade de montagem Comprar componentes ou fabricá-los Frágil Utilizadores mais avançados	1 extrusor Possível 2º extrusor? Frágil Peças feitas por impressão 3D Disponibilidade 3-4 semanas	1 extrusor neste momento	Software fechado Difícil acesso 1 extrusor	Estrutura Madeira 1 extrusor	Software fechado? Ou ReplicatorG? Dificuldade em aceder aos componentes 1 extrusor

Atendendo a estes fatores e após uma fase de *brainstorming*, o modelo selecionado foi o “**3D Printer**” da empresa CB-Printer®, sediada na Polónia, mostrada de seguida na Figura 9.

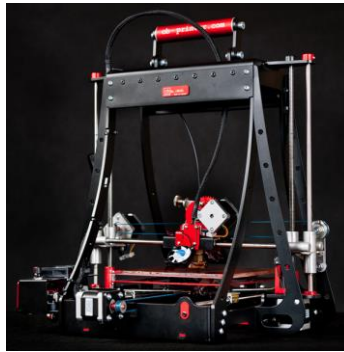


Figura 9 – CB-Printer [18]

Este equipamento de FDM apresenta como pontos fortes o facto de, possuir uma elevada robustez devido ao material da estrutura; os movimentos do extrusor; os movimentos da mesa sendo esta aquecida; possuir *software open-source* e a possibilidade de vir a ser colocado um segundo extrusor. Complementando estas características com um preço acessível - tendo em conta as características que apresenta, fez com que o modelo da empresa CB-Printer® fosse o escolhido.

O movimento do extrusor e da plataforma são relevantes na escolha, pois de certa forma indicam como deve ser o componente que promove o acoplamento entre a mini-extrusora e o equipamento. O facto de apresentar uma plataforma aquecida vai ajudar a evitar a acumulação de tensões residuais nas peças ao longo da sua fabricação, prevenindo o aparecimento de imperfeições nos modelos, tais como, empenos e outros defeitos visíveis.

3.2 Definição das especificações da extrusora

Depois de analisadas as várias características dos modelos de equipamentos de FDM apresentados na Tabela 4, e tendo em conta os requisitos do produto, foram consideradas as seguintes escolhas para o desenvolvimento da mini-extrusora:

- **Compacta:** a mini-extrusora deverá apresentar dimensões que estejam de acordo as dimensões do equipamento adquirido para não surgirem problemas no acoplamento do equipamento e impeçam o movimento dos seus componentes (300x200x100 mm dimensões máximas);
- **Eficaz / Alta precisão;**
- **Velocidade de rotação máxima dos fusos de 20 rpm:** Estabeleceu-se esta velocidade máxima baixa, pois pretende-se adequar o débito de extrusão à alimentação do extrusor do equipamento, sendo esta igualmente baixa – aproximadamente 80 m/h [metro/hora];
- **Débito baixo e constante:** é importante que o débito se mantenha estável e constante, não variando consideravelmente para não haver defeitos ao longo da alimentação da extrusora. Este deve ser igualmente baixo, porque o processo de deposição durante a

FDM é por si só um processo lento, logo, o débito de extrusão deve ser adequado ao débito do equipamento de FDM aquando da deposição do material;

- **Diâmetro da fieira de 2 mm:** definido de acordo com o inchamento que o fundido irá sofrer à saída da fieira, de maneira a ser possível extrudir um filamento com um diâmetro aproximado de 3mm (diâmetro do filamento usado na máquina de FDM CB-Printer®);
- **Mecanismo de acoplagem ao equipamento adaptável a qualquer outra máquina:** deve optar-se por uma placa modular ou outro tipo de solução, com possibilidade de ser usado para todo o tipo de modelos de equipamentos de FDM existentes no mercado;
- **Ser modular:** A extrusora a desenvolver deve ser versátil ao ponto dos componentes que compõem este equipamento possam, no futuro, ser substituídos por outros em caso de desgaste/quebra desses, e quando for necessário usar componentes que apresentem outras dimensões, como por exemplo fieiras de dimensões diferentes, ou mesmo no caso de ser necessário proceder a alterações à constituição da máquina por algum motivo ou mesmo melhoria do equipamento desenvolvido.
- **Possibilidade de extrudir qualquer tipo de material polimérico na sua forma “virgem” (grânulos ou pó);**
- **Gama de temperaturas:** Estabeleceu-se uma gama de temperaturas de processamento entre 160°C e 280°C, porque alguns polímeros, como por exemplo HDPE, LDPE, PP, PC, ABS, PA, entre outros, a serem processados, apresentam temperaturas dentro desta gama de valores;
- **Não vibrar/silenciosa;**
- **Equipamento de baixo custo.**

3.3 Dimensionamento

Após definição das especificações da extrusora, realiza-se o dimensionamento geral do conjunto, sendo este efetuado no sentido inverso ao do escoamento do material, ou seja, desde a fieira até ao cilindro da extrusora.

No entanto, é imprescindível determinar alguns parâmetros geométricos dos parafusos a utilizar, como o D_i , D_e e H do parafuso, devidamente identificados pela legenda da Figura 10.

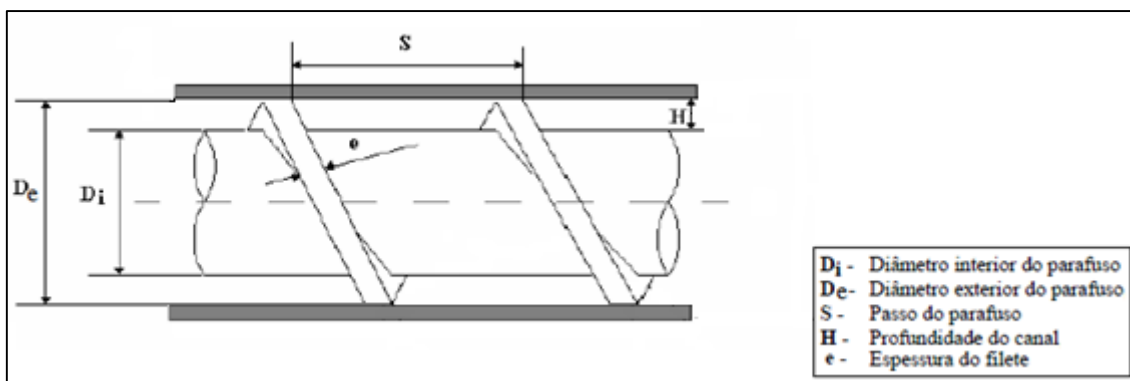


Figura 10 – Ilustração dos parâmetros geométricos de um parafuso

3.3.1 Parâmetros geométricos dos fusos

De modo a proceder à escolha do D_i (diâmetro interno) do parafuso, é indispensável determinar a profundidade do canal (H), parâmetro que poderá influenciar direta ou indiretamente a escolha desse diâmetro. Definidos estes valores, será possível então, através da Equação (1), determinar o D_e (diâmetro externo) do parafuso.

$$D_e = D_i + 2H \quad (1)$$

A primeira variável a determinar é a H . Para isso foi realizada uma verificação das dimensões de vários grânulos, a partir de materiais existentes na Universidade. Estes foram catalogados por geometria, tipo de polímero, fabricante e dimensões, passível de ser visualizados através da Tabela 6 apresentada de seguida.

Tabela 6 - Catalogação dos materiais existentes na Universidade

Geometria grânulo	Tipo Polímero	Fabricante	Dimensões [mm]
Esférica	PLA	ITENE®	4 x 3
	PP	DOW®	3,5 x 3,5
Cilíndrica	PA6	KOPA®	2 x 1,9
	PMMA	DOMM®	3 x 2,5
	ABS	POLIVERSAL®	3,3 x 3,2
Oval	PE	LYONDELL®	4 x 2,9

Após análise de toda a informação recolhida (Tabela 6), conclui-se que a escolha de **4mm** para H é o valor apropriado.

Definido o valor de H , pode-se passar, agora, para a definição do D_i . De acordo com uma pesquisa efetuada, sobre configurações de equipamentos semelhantes ao estudado, verificou-se que a escolha do D_i do parafuso nesse equipamento era de 7mm. [19] Este parâmetro está ligado à resistência mecânica do parafuso necessária. Assim, tendo em conta as dimensões previamente definidas para a extrusora a utilizar neste projeto, a escolha acabou por recair no uso de um fuso com um D_i de **6mm**.

Finalmente, o D_e poderá ser calculado a partir da Equação (1), obtendo-se um valor de **14mm** para este parâmetro.

Foram equacionados dois tipos de soluções a adotar no caso dos fusos, isto é, poderiam vir a ser escolhidos fusos cónicos ou cilíndricos. Esta seleção dependeu do grau mais simples ou mais complexo de *design* de maquinagem desses elementos, e dos apoios a adotar.

Tendo em conta as características apresentadas por ambos os fusos, optou-se pelo uso de fusos cilíndricos porque, em termos de maquinagem é menos complexo e face às dimensões escolhidas e ao tipo de apoios (paralelos) dos elementos normalizados existentes no mercado, ser mais abrangente para este tipo de aplicação, como se comprovará no subcapítulo 3.4.

Após se terem definido os parâmetros geométricos dos fusos, passou-se para o dimensionamento das diferentes secções que os compõem. Na Figura 11, apresenta-se o perfil de um fuso de uma extrusora convencional industrial, onde se ilustram as diferentes zonas funcionais desse elemento. A figura permitiu, por comparação, efetuar as escolhas para dimensionar e construir as secções do fuso da extrusora a projetar, tendo em conta as dimensões gerais de cada secção.

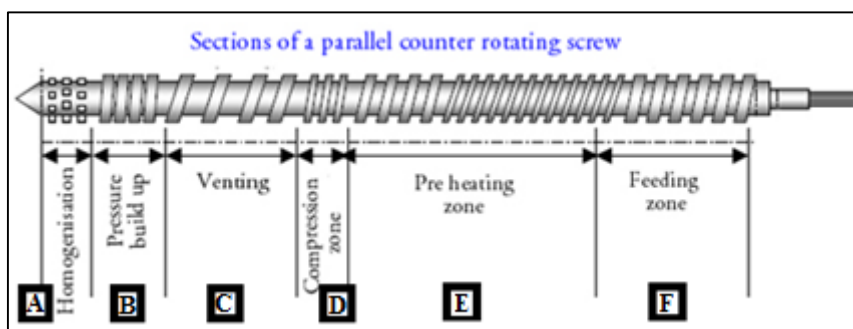


Figura 11 – Secções do fuso de uma extrusora contra-rotativa [20]

As secções escolhidas para os fusos foram a **B**, **D**, **E** e **F** da Figura 11, visto serem as necessárias para que ocorra uma plasticização eficaz ao longo do comprimento do canal do extrudido da mini-extrusora (Figura 12).

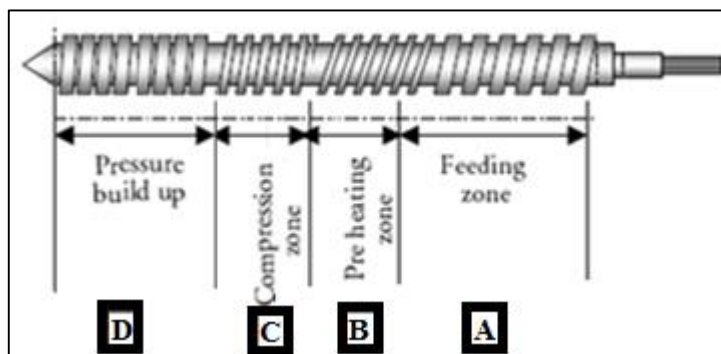


Figura 12 – Secções escolhidas para o fuso a utilizar na mini-extrusora

Para determinar o comprimento das 4 secções escolhidas e representadas na Figura 12, procedeu-se às seguintes considerações:

- Zona de alimentação (Secção A): é importante que este apresente uma zona de alimentação suficientemente comprida para que o material possa percorrer toda essa

secção, aquecendo o material sem o fundir e sem bloquear o seu transporte ao longo do canal até à próxima secção. Como se pode analisar pela geometria desta secção, o passo do fuso é o suficiente entre filetes para que os grânulos se acumulem nas câmaras e, uma inclinação da hélice para que estes possam ser transportados homogeneamente ao longo desta secção;

- Zona de pré-compressão (Secção B) e zona de compressão (Secção C): estas duas zonas são caracterizadas pela compressão e fusão do material, apresentando o mesmo comprimento. Na secção 2 existe uma inclinação da hélice mais acentuada, comparativamente com a da secção 3, com o objetivo de se criar pressão nesse local do parafuso. No entanto, à medida que se avança, essa inclinação vai diminuindo. Os filetes nestas duas zonas apresentam, ainda, uma espessura mais reduzida, comparativamente com a secção 1 porque se pretende começar a induzir a mistura ao longo destas duas secções;
- Zona de medição (Secção D): é nesta zona que o material se encontra totalmente fundido e assim preparado para ser extrudido. É importante que esta secção apresente um comprimento suficiente para que haja um volume de material considerável nas câmaras em C a ser extrudido (Figura 7). Nesta última secção a espessura dos filetes volta a ser semelhante ao da zona de alimentação, pois será aqui que se gerarão maiores pressões devido à geometria do canal de escoamento. Comparativamente com a secção 3, verifica-se um passo mais reduzido, uma vez que o material encontra-se completamente fundido.

Na tabela abaixo, dá-se a conhecer o comprimento das 4 zonas funcionais escolhidas para os fusos da mini-extrusora.

Tabela 7 - Escolha das secções utilizadas nos fusos da mini-extrusora

Secção do fuso ilustrado (fig. 11)	Secção do fuso dimensionado (fig. 11)	Comprimento [mm]
B	D	40
D	C	20
E	B	20
F	A	40

Na Figura 13 é possível visualizar a geometria adotada para os fusos a usar na mini-extrusora desenhados previamente em SolidWorks®.

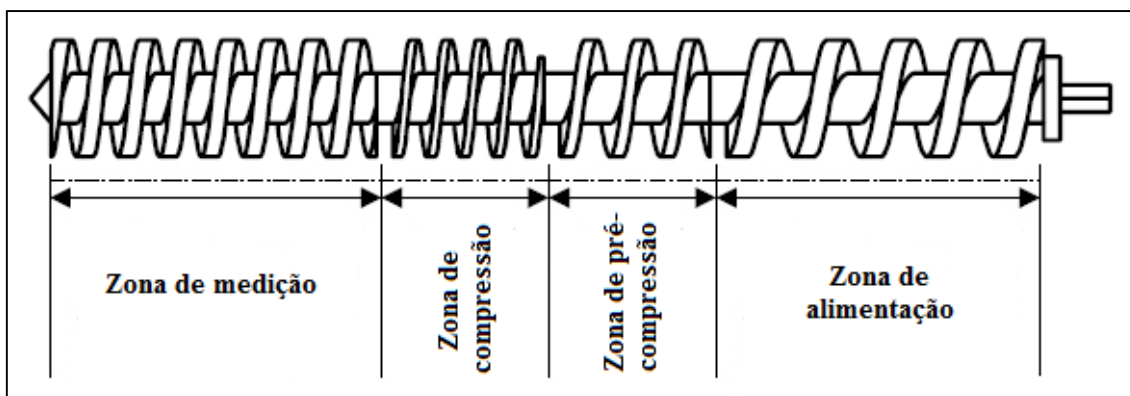


Figura 13 – Fuso da mini-extrusora desenhado em SolidWorks®

O parafuso ilustrado na Figura 13 apresenta um comprimento final de **120mm** de acordo com a Tabela 7. É importante que este elemento possua um comprimento suficiente para que ocorram as etapas mencionadas anteriormente para que o processo de plasticização seja eficaz.

3.3.2 Definição da queda de pressão e do débito da extrusora

Dando continuidade à metodologia de trabalho conforme consta no fluxograma apresentado na Figura 8, e depois de definidos os parâmetros geométricos dos fusos, segue-se o cálculo da queda de pressão e do débito da extrusora.

Para ser perceptível, na Figura 14 é apresentada uma imagem onde se pode visualizar, em corte, o tipo de construção e geometria escolhidos para esses módulos.

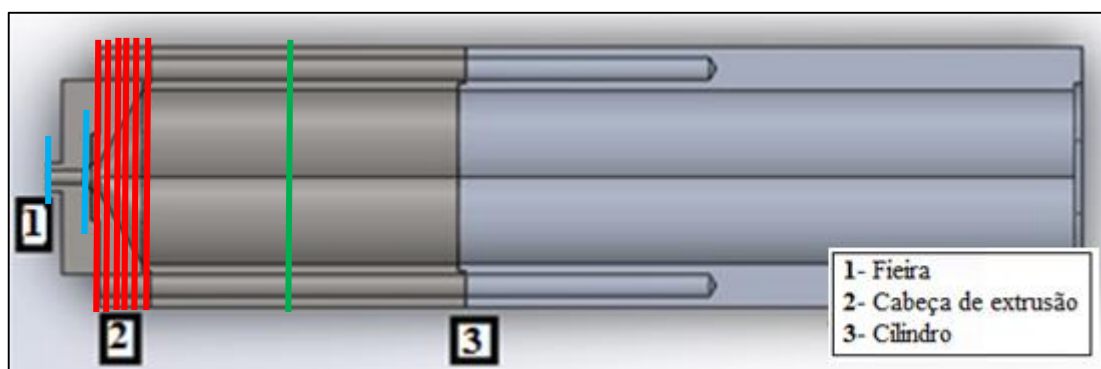


Figura 14 – Ilustração da secção transversal da mini-extrusora

De modo a se definirem a ΔP (queda de pressão) e o Q (débito) do conjunto, é necessário, no entanto, definir primeiro, as dimensões dos módulos 1, 2 e 3 da extrusora.

O ponto de partida para essa escolha, foi o diâmetro de 2mm do orifício final da fieira definido no subcapítulo 3.2. A fim de se obter maior precisão relativamente ao cálculo dos valores da ΔP e do Q do conjunto, os módulos 1, 2 e 3 foram subdivididos em segmentos, assinalados a cor na Figura 14, resultando na informação presente na Tabela 8. Nesta tabela, apresentam-se as dimensões em [mm] do L (comprimento) e D (diâmetro) dos vários segmentos subdivididos para cada um dos módulos.

Tabela 8 - Escolha das dimensões gerais de cada módulo em [mm]

	Módulo 1				Módulo 2												Módulo 3	
Segmento	1		2		1		2		3		4		5		6		1	
	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L	D
[mm]	5	2	1	4	1	4	1	8	1	12	1	16	1	20	1	24	120	20

A ΔP total será determinada pela soma dos valores da ΔP , ocorridas nos segmentos de cada módulo, a partir dos valores da Tabela 8. Segundo esta tabela, é possível também verificar que o canal de fluxo do módulo 1 possui um L de 5mm e um D de 2mm. Desse modo, estando o débito diretamente relacionado com a sua secção transversal, e esta ser a mais pequena em dimensões, comparativamente com as dos módulos 2 e 3, o valor a definir para o Q do módulo 1, será mantido ao longo dos cálculos, visto ser igual em qualquer segmento ao longo do comprimento total do canal de escoamento da extrusora. É indispensável que se calculem variáveis como a ΔP e Q, pois a pressão a determinar será a necessária para fazer fluir o fundido, através do percurso total da fieira ao débito desejado.

Para se poder determinar a ΔP total é necessário inicialmente definir o Q. Esta variável está diretamente relacionada com a v (velocidade linear) do fuso, e com a A (área) da fieira. O valor da variável “A” foi determinado a partir da equação da área de um círculo, visto ser idêntica à secção transversal da geometria do canal de fluxo da fieira. Assim, a partir do diâmetro de 2mm, obteve-se um valor de **3,14E-06 m²** para essa variável. Relativamente à variável “v”, e tendo-se estabelecido um valor máximo de 20 rpm – velocidade angular – (subcapítulo 3.2.), foi necessário transformar essa velocidade em linear, através da Equação (2), de modo a poder realizar os cálculos consequentes.

$$v = r * RPM * 0,10472 \quad (2)$$

Feito o cálculo, definiu-se um valor de **4,19E-03 m/s** para “v”. Neste momento, é possível calcular o débito a partir da Equação (3),

$$Q = v * A \quad (3)$$

Concluindo-se que o valor Q da fieira é de **1,32E-08 m³/s**.

Após determinar a variável “Q”, usar-se-á este valor para realizar o cálculo da ΔP dos módulos. A relação entre Q e P é demonstrada a partir da Equação (4),

$$Q = G * \frac{\Delta P}{\eta} \quad (4)$$

onde “G” é uma constante geométrica que depende da secção transversal e do comprimento do segmento a calcular, pela Equação (5). Os polímeros fundidos, na gama típica de temperaturas de extrusão, têm η (viscosidade) na ordem dos 10^1 - 10^3 [Pa.s], pelo que foi definido um valor tipo, para a generalidade dos materiais poliméricos, de **1000 Pa.s**. Sendo a geometria do canal da mini-extrusora circular, será usada esta equação ao longo dos cálculos da ΔP e do Q.

$$G = \frac{\pi * r^4}{8L} \quad (5)$$

De acordo com os valores das dimensões das secções dos módulos identificados na Tabela 8, e recorrendo às Equações (4) e (5), é possível, finalmente, determinar o valor ΔP total a partir da soma dos módulos 1, 2 e 3. Na Tabela 9 são apresentados esses valores:

Tabela 9 - ΔP total do sistema

ΔP módulo 1 [Pa]	1,70E+05
ΔP módulo 2 [Pa]	2,26E+03
ΔP módulo 3 [Pa]	1,67E+03
ΔP [MPa] total	0,17

Como previsto, os valores de ΔP apresentados são baixos. Isto é consequência das dimensões reduzidas das secções transversais e dos comprimentos nos canais da extrusora, nomeadamente na cabeça de extrusão e fieira.

3.3.3 Binário do motor

O binário é uma variável que está diretamente relacionada com a força a ser exercida sobre um veio e o diâmetro desse mesmo veio. Depois de definidas as variáveis D_i e D_e dos fusos, e a ΔP do sistema, pode-se determinar a P (Potência) e o T (Binário), que permitirão escolher o motor apropriado a utilizar no projeto.

Como o valor da F (força), nesta fase, é ainda uma incógnita, para se determinar esse valor deve-se proceder, em primeiro lugar, à resolução apresentada na Equação (6),

$$F = P * A \quad (6)$$

em que “ P ” é, **0,17 MPa**, valor já conhecido anteriormente, e “ A ” a área dos veios, onde será aplicada a força nos dois fusos da mini-extrusora.

Na posse destes dados, a Equação (7) permite chegar, assim, ao valor da variável “ A ”:

$$A = \pi * (R^2 - r^2) \quad (7)$$

sendo R (raio externo) de **7mm** e r (raio interno) de **3mm** do parafuso, valores correspondentes ao D_e e D_i definidos anteriormente. Feitos os cálculos, o valor determinado para a variável “ A ” é de **2,51 E-04 m²**, sendo então possível calcular o valor da variável “ F ” a partir da Equação (6).

Finalmente, para determinar o binário aplica-se a Equação (8). Como mencionado anteriormente, esta variável está relacionada com o diâmetro do veio, onde será aplicada a força determinada, sendo este diâmetro igual ao D_i do parafuso (6mm).

$$T = F * D \quad (8)$$

Resolvida a equação, foi obtido um valor de **0,5 Nm** para o binário. Neste valor, está já incluído um fator de segurança (2) para a seleção do motor, de forma a salvaguardar qualquer tipo de oscilações que possam ocorrer durante o processo de extrusão.

3.4 Seleção e compra de elementos normalizados

De forma a selecionar os elementos a adquirir (parafusos de aperto, casquilhos, acessórios para temperatura e transmissão de potência), com as especificidades adequadas para promover o correto funcionamento da extrusora, procedeu-se ao levantamento no mercado desses elementos normalizados, legendados na Figura 15.

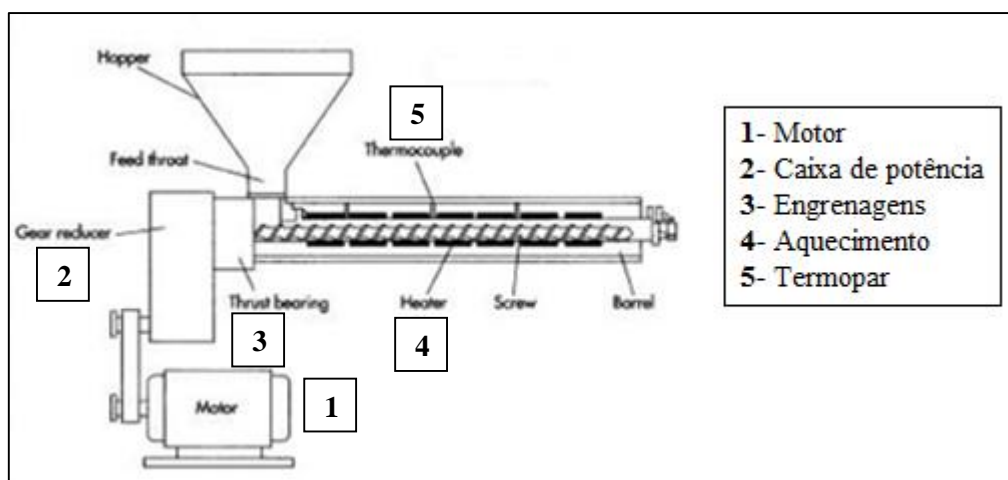


Figura 15 – Ilustração dos elementos normalizados presentes numa extrusora convencional

Como resultado dessa pesquisa enumeram-se de seguida as escolhas efetuadas:

1- Motor

A velocidade máxima de rotação dos fusos foi definida anteriormente no subcapítulo 3.2 como 20 rpm. Assim sendo, era necessário encontrar um motor adequado a essa velocidade com um valor de binário máximo de 0,5 N.m., características que possibilitem fazer com que a extrusão de material polimérico decorra sem falhas, e permitam um débito e velocidade de rotação constantes. Caso não se garantam estes requisitos, poderão surgir defeitos no extrudido, que influenciem a alimentação da impressora, provocando defeitos na produção dos objetos tridimensionais.

Assim, o tipo de motor idealizado para usar neste equipamento será um motor de passo (*step-motor*). Estes motores, devido à sua sincronização, precisão, nível de transmissão de potência e peso, apresentam-se mais vantajosos que os motores de corrente contínua (CC). Os motores de passo são classificados pelo binário (T) que produzem. [21]

Após efetuada uma pesquisa pelos fabricantes deste tipo de motores, conclui-se que existem no mercado, motores com o valor de binário de 0,5 N.m, como por exemplo o modelo “PKP245D15A-L” do fabricante OrientalMotor® (com **0,58 N.m** de binário). Na Figura 16 apresenta-se a curva característica desse motor.

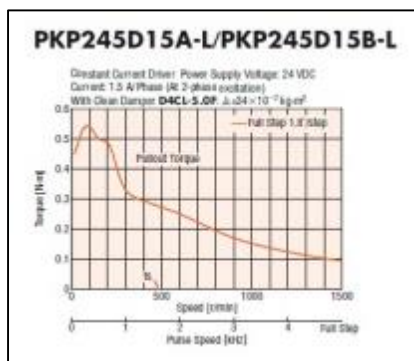


Figura 16 – Curva característica do motor selecionado [22]

As dimensões deste motor estão presentes no anexo I. É importante a análise das suas dimensões, de maneira a garantir que este se adeque ao tamanho máximo definido para a mini-extrusora (300mm) e assim poder acoplá-lo sem problemas. O seu peso também se considera relevante, uma vez que é imprescindível que não prejudique o peso total do conjunto, obrigando à colocação extra de apoios para equilíbrio da extrusora.

Todavia, para efeitos de experiência, nesta primeira fase de estudo foi usado um motor disponível na Universidade. O motor utilizado foi o “BLFM230-GFS” do fabricante OrientalMotor®. Para poder definir a velocidade de rotação dos fusos foi disponibilizado também pela Universidade, um controlador de velocidade.

2- Caixa de potência

A caixa de potência é um equipamento composto por engrenagens responsável por reduzir a velocidade do movimento de rotação dos motores para que sejam transferidos aos eixos de tração. A principal função da caixa é aumentar ou reduzir o binário.

No caso concreto deste estudo, o mais adequado será a escolha de um sistema de transmissão de velocidade direto, como indicado na Figura 17, ou seja, um sistema que não apresente mais engrenagens para reduzir a velocidade, o que provocaria um aumento do peso do conjunto. Isto resultaria numa extrusora pesada, característica oposta ao pretendido com este projeto. O conceito de montagem a adotar para este componente é apresentado de forma ilustrativa na Figura 17. Como se pode verificar existem apenas dois veios engrenados. Um deles estará acoplado ao veio do motor, que por ação do movimento desse, transmitirá movimento ao outro. Desse modo, os dois veios presentes na caixa irão rodar à mesma velocidade e frequência como pretendido.

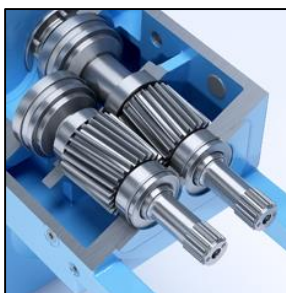


Figura 17 – Conceito do sistema de transmissão de potência direto [23]

3- Engrenagens

No projeto em causa, de acordo com as dimensões dos componentes calculados, a distância entre os centros dos veios que estarão acoplados nos fusos da mini-extrusora, é de 10,10 mm. Na pesquisa aos fabricantes deste tipo de componentes, não foram encontrados elementos com estas características e que engrenassem um no outro corretamente. Os elementos normalizados encontrados ou apresentavam medidas superiores ou inferiores ao pretendido.

Ainda relativamente a estes elementos, deve ser selecionado o tipo de engrenagem a adotar que transmita maior precisão ao movimento necessário destes elementos, podendo optar-se por engrenagens cilíndricas de dentes retos ou engrenagens de dentes helicoidais.

As engrenagens cilíndricas de dentes retos apresentam como vantagens o facto de serem mais fáceis de maquinar devido à sua simplicidade; são mais eficientes comparativamente com as engrenagens helicoidais de igual tamanho e são mais fáceis de acoplar/engrenar. As engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais são mais vantajosas, porque são mais silenciosas durante o seu funcionamento, aguentam maiores cargas comparando com engrenagens de igual tamanho de dentes retos (o dente é mais largo devido à sua posição diagonal ao longo do comprimento da engrenagem) e apresentam maior precisão. [24]

Uma vez que a precisão é a condição essencial para a escolha entre estes dois tipos de elementos, a escolha acabou por recair no uso de engrenagens cilíndricas de dentes helicoidais.

Para colocar e “segurar” na caixa de potência as engrenagens e promover o movimento dos veios onde estarão acopladas, serão necessários adquirir outros elementos. A Figura 17 apresenta um tipo de conceito diferente do da Figura 18, ao usar rolamentos em vez de casquilhos para esse fim.

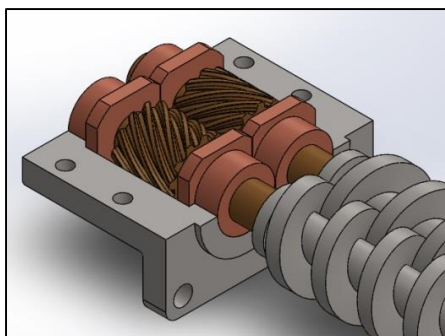
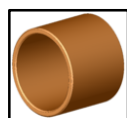


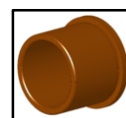
Figura 18 – Caixa de potência com engrenagens e casquilhos

Os casquilhos apresentam-se como a melhor opção, em primeiro lugar, devido à falta de espaço para colocar elementos de maiores dimensões como sejam os rolamentos, segundo por serem mais leves que os rolamentos, e terceiro porque não necessitam de tanta manutenção.

Na caixa de potência podem ser utilizados dois tipos de casquilhos: casquilho do tipo “a” (a) ou casquilho do tipo “b” (b), ilustrados na Figura 19.



(a)



(b)

Figura 19 – (a) casquilho tipo “a” e (b) casquilho tipo “b” [25]

Estes exemplos são os mais utilizados nas aplicações que usam este tipo de componentes. As diferenças entre o casquilho “a” e o “b”, encontram-se apenas na sua forma. Enquanto o primeiro possuiu uma forma simples, em “manga”, o segundo apresenta termina em “flange”. Este último é utilizado para localizar positivamente o casquilho quando instalado ou para providenciar uma superfície de rolamento (situação preconizada na caixa de potência). Por essas razões, o casquilho do tipo “b” foi o escolhido para usar na caixa de potência.

O tipo de material deste componente é uma variável importante, pois influencia o tipo de aplicação. Optaram-se por adquirir casquilhos de bronze por serem auto lubrificantes e por poderem ser utilizados em aplicações de altas e baixas temperaturas.

Os casquilhos serão colocados, como se pode comprovar pela Figura 18, nos veios das engrenagens. A escolha das dimensões deste componente foi definida de acordo com o comprimento dos veios e do diâmetro externo dos mesmos. Por este motivo, os casquilhos devem possuir um diâmetro interno de acordo com o diâmetro externo dos veios das engrenagens (**6mm**).

4- Aquecimento

Para aquecer o material polimérico no seu interior, a extrusora deve possuir um dispositivo de aquecimento. O formato mais usual é o uso de resistências do tipo ilustrado na Figura 20.

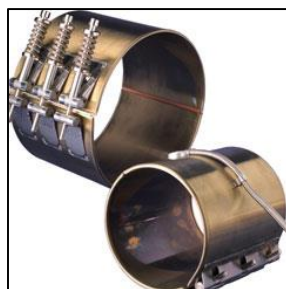
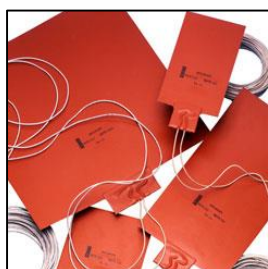


Figura 20 – Resistências de banda circular habitualmente usadas nas extrusoras convencionais

Porém, devido às dimensões idealizadas para a mini-extrusora e a geometria a adotar, fizeram com que a escolha deste tipo de resistências não fosse a escolhida. Procurou-se, por isso, encontrar outra forma de aquecimento que se adaptasse às características e geometria da extrusora. As melhores opções seriam resistências do tipo “placas flexíveis” (a) ou de “cartuchos” (b), devidamente ilustradas na Figura 21.



(a)



(b)

Figura 21 – Tipo de resistência a usar na extrusora: (a) resistência do tipo placa flexível; (b) resistência do tipo cartucho [26]

Tendo em conta que as resistências do tipo (a) estão disponíveis no mercado com dimensões normalizadas, situação que não se coaduna com as dimensões dos componentes já definidos neste projeto, a escolha incidu, então, no uso de resistências do tipo (b). Estas resistências permitem ser colocadas no interior do equipamento, necessitando apenas de se escolher o tamanho e diâmetro adequado. Por outro lado, pretende-se que as resistências não aqueçam em demasia a zona de alimentação do material no cilindro, de forma a não provocar o amolecimento e consequente obstrução da alimentação da extrusora.

A Figura 22 mostra que se escolheu colocar os cartuchos de aquecimento no espaço compreendido desde a cabeça de extrusão até cerca de $2/3$ do comprimento total do cilindro da mini-extrusora.

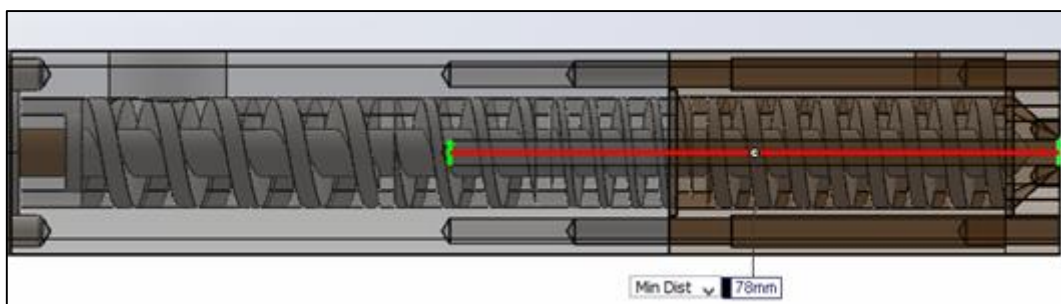


Figura 22 – Colocação e comprimento do furo para os cartuchos de aquecimento

Após determinação do comprimento do furo para colocação dos cartuchos, efetuou-se uma pesquisa pelos fabricantes deste tipo de componentes. Na Tabela 10 apresentam-se os cartuchos com um diâmetro de 1/8” (3,10 mm) com terminação do tipo N (tipo de terminação ilustrada na Figura 23) do fabricante Omega®.

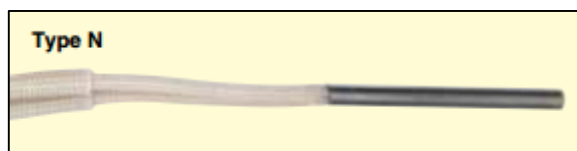


Figura 23 – Cartucho do tipo N [27]

A Tabela 10 permite também observar as características de cada modelo de cartucho. A variável a ter em conta para a escolha deste componente foi o seu comprimento, identificado na tabela como “*Sheat Length [mm]*”.

Tabela 10 - Modelos disponíveis de cartuchos de aquecimento da empresa Omega® [28]

1/8" Diameter, Actual 3.10 mm (0.122") with Type N Termination 254 mm (10") Leads						
Model Number		Sheath Length		Watts	Watt Density	
120V	240V	mm	inch		Watts/cm ²	Watts/in ²
HDC19100	—	31.8	1 1/4	25	14	90
HDC19101	—	31.8	1 1/4	35	20	126
HDC19102	—	31.8	1 1/4	50	28	180
HDC19103	—	38.1	1 1/2	30	12	80
HDC19104	—	38.1	1 1/2	60	25	160
HDC19105	—	50.8	2	40	11	70
HDC19106	HDC19112	50.8	2	50	13	87
HDC19107	HDC19113	50.8	2	100	27	175
HDC19108	—	63.5	2 1/2	50	11	68
HDC19109	—	76.2	3	60	10	64
HDC19110	—	88.9	3 1/2	70	10	62
HDC19111	HDC19114	101.6	4	80	9	60
Note: 3.18 mm (1/8") diameter hi-density cartridge heaters are made-to-order only. Standard lead time is 3 weeks.						

A partir do conceito apresentado na Figura 22, escolheu-se o modelo assinalado a amarelo na Tabela 10, porque é o único que apresenta um comprimento aproximado (**76,2 mm**) do furo onde serão colocados os cartuchos.

Estes cartuchos apresentam um diâmetro de 3,1mm e uma potência de 60W. Definiu-se um furo de diâmetro 1mm mais largo para colocação deste componente, porque este vai dilatar por ação do aquecimento. Foram adquiridos 4 cartuchos para um aquecimento mais uniforme, tendo sido colocados a uma distância de 3mm, desde o centro do furo da sua colocação, às paredes exteriores da extrusora, como se pode ver pelas setas ilustradas a vermelho na Figura 24.

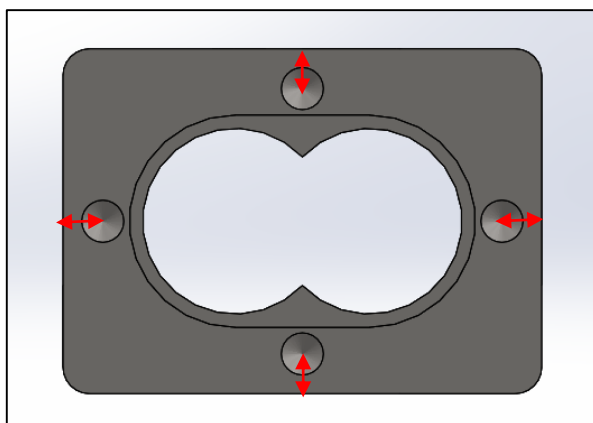


Figura 24 – Posição dos cartuchos na mini-extrusora

5- Termopar

De modo a controlar a temperatura que se pretende estabelecer durante a extrusão, é imprescindível o uso de termopares/sondas de temperatura. Estes, ligadas a um controlador, permitem, por um lado, determinar qual a temperatura definida no início do processo de extrusão, de acordo com a temperatura de processamento do material a extrudir, e por outro, verificar a temperatura instantânea do equipamento.

Para escolher o tipo de termopar/sonda de temperatura adequado a este tipo de aplicação, a Tabela 11 apresenta a gama de temperaturas destes componentes disponíveis no mercado.

Tabela 11 - Gama de temperaturas dos termopares disponíveis no mercado [29]

Gamas de temperatura dos termopares/ Notas			
Tipo	Elemento	Gama de Temperatura (°C)	Notas
T	Cobre (+) / Cobre Níquel (-)	-40...+300	Utilizado para baixas temperaturas
E	Níquel crômio (+) / Cobre Níquel (-)	-40...+800	Utilizado em atmosféricas de baixa oxidação e de elevada sensibilidade
J	Ferro (+) / Cobre Níquel (-)	-40...+700	Baixo custo e muito utilizada na indústria plástica. Gama de temperatura limitada.
K	Níquel crômio (+) / níquel alumínio (-)	-40...+1100	Baixo custo. Mais fidedel para gamas de temperatura mais elevadas. Bom comportamento em atmosferas oxidantes
N	Níquel crômio Silício (+) / Níquel Silício (-)	-40...+1250	A sua elevada estabilidade e resistência à oxidação a altas temperaturas tornam o tipo N adequado para medições a temperaturas elevadas
S	Platina 10% Ródio (+) / Platina	0...+1550	Adequado para medição de temperaturas elevadas. Reduzida sensibilidade, elevada estabilidade e custo elevado.
R	Platina 13% Ródio (+) / Platina	0...+1600	Adequado para medição de temperaturas elevadas. Reduzida sensibilidade e custo elevado.
B	Platina 30% Ródio (+) / Platina 6% Ródio	100...+1600	Características similares ao tipo R e S. Adequado para medição de temperaturas até 1800°C, por períodos curtos.

Os termopares habitualmente usados na extrusão são do tipo J ou K. Como as temperaturas a atingir num processo de extrusão convencional nunca ultrapassarão os 300°C, e tendo em conta a nota presente Tabela 11 (“baixo custo e muito utilizada na indústria plástica”), foi escolhido um termopar do tipo J.

Para testar a extrusora, foi disponibilizado pela Universidade um controlador de temperatura da marca OMRON®.

Finalmente, para se poderem acoplar/apertar os componentes constituintes do conjunto da mini-extrusora será necessário utilizar parafusos de aperto.

Estes elementos foram também alvo de uma pesquisa profunda devido às dimensões usadas na mini-extrusora. De forma a poupar espaço, foram escolhidos parafusos específicos, ou seja, parafusos que ocupassem o espaço estritamente necessário, para não interferir demasiado com a espessura das paredes e com a colocação dos componentes constituintes da extrusora. Na Tabela 12 estão identificados os vários tipos de parafusos usados no aperto dos componentes da extrusora.

Tabela 12 - Tipo, dimensões e quantidades de parafusos de aperto utilizados na extrusora

Tipo de parafuso	Dimensões	Quantidades
Cabeça oval sextavada 	M3 x 8	8
	M4 x 12	8
Cabeça cilíndrica sextavada 	M4 x 55	4

Com a aquisição destes últimos componentes, fica assim concluída a seleção de todos os elementos normalizados a utilizar na extrusora.

3.5 Etapas para a construção da extrusora

Através de *softwares* de desenho rápido, é possível obter uma perspetiva em três dimensões das peças desenhadas, bem como avaliar as propriedades físicas das mesmas. Nesse sentido, recorreu-se à ferramenta *SolidWorks*®, para desenhar os componentes da mini-extrusora projetada.

Nas etapas que se seguem, é possível acompanhar a evolução que o projeto sofreu desde a sua conceção até à obtenção da versão final, passando pelas escolhas efetuadas para otimização do produto.

A Figura 25 mostra a primeira versão desenhada para a projeção da mini-extrusora. Nesta altura, o projeto ainda se encontrava numa fase embrionária.

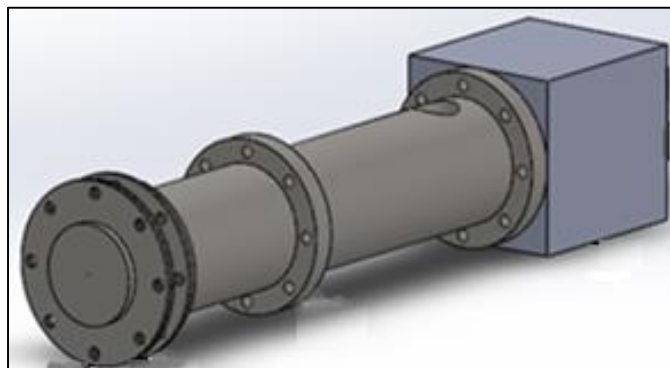


Figura 25 – Primeira versão da mini-extrusora

Depois de uma fase de reflexão e troca de impressões no sentido de otimizar o equipamento em termos de espaço e peso foram desenhados duas geometrias para o modelo deste: circular (a) ou retangular (b).

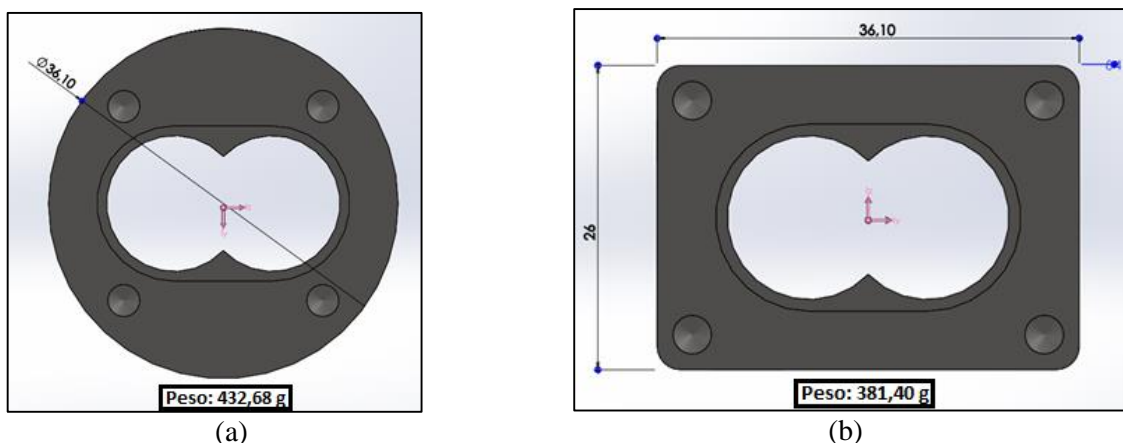


Figura 26 – Tipo de geometria para a mini-extrusora: (a) circular; (b) retangular

Recorrendo ao uso da ferramenta SolidWorks®, cujas funcionalidades permitiram determinar o peso dos modelos desenhados, apresentados na Figura 26, chegou-se à conclusão que a adoção de uma geometria retangular era mais vantajosa, de acordo com os requisitos pré-definidos.

De forma a ser possível efetuar o acoplamento com precisão entre os componentes da mini-extrusora apresenta-se, de seguida, a melhor forma de realizar esta operação. Perante este cenário, recorreu-se a uma solução do tipo “macho-fêmea”, como mostra a Figura 27. Com este tipo de solução, resolvia-se também o possível “babamento” do material polimérico fundido durante o processo de extrusão.

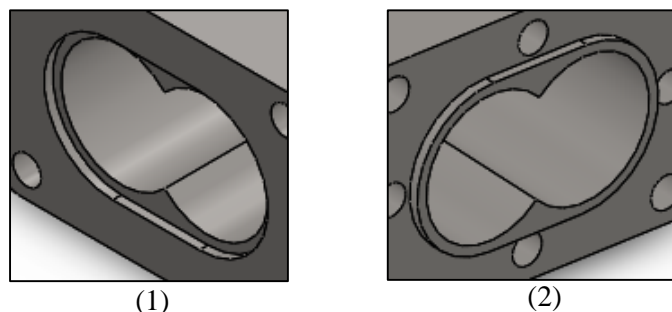


Figura 27 – Solução do tipo “macho-fêmea”: (1) fêmea; (2) macho

Como se pretendia projetar um equipamento cujo peso fosse o mais reduzido possível, nesta fase, estudou-se a aplicação de materiais com diferentes densidades para os vários módulos. Nas zonas de alimentação e compressão, optou-se por utilizar um material de baixa densidade, porque aí não se geram pressões altas e a resistência mecânica é igualmente baixa. Na zona de medição, optou-se por usar um material de maior densidade, visto ser o local onde se geram maiores pressões e maior resistência mecânica. Estas evidências estão ilustradas na Figura 28.

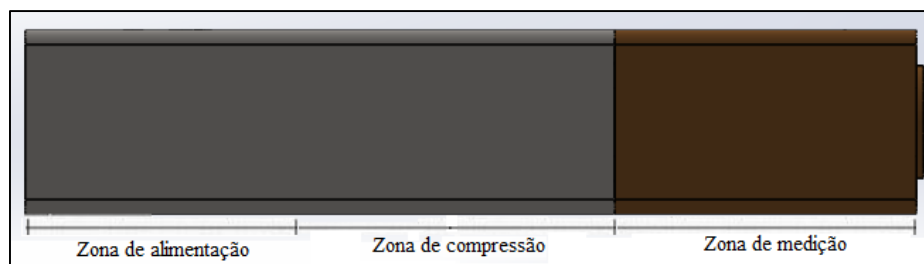


Figura 28 – Equipamento constituído por diferentes materiais

Outra propriedade fundamental para o material a aplicar nesta última zona, seria apresentar um coeficiente térmico elevado, de forma a aquecer rapidamente, conduzindo esse calor aos componentes nele acoplados.

Resolvido este problema, na fase seguinte, definiu-se a solução para promover o acoplamento entre os fusos e as engrenagens. A solução encontrada passou pelo uso de um sistema tipo “macho-fêmea” com a forma sextavada, onde os machos seriam os fusos e as fêmeas as engrenagens. Na Figura 29 pretende-se mostrar como funciona esse sistema.

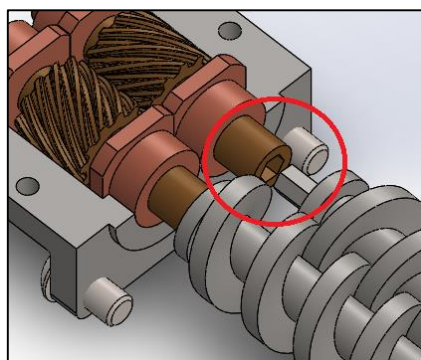


Figura 29 – Sistema tipo “macho-fêmea” para os fusos e engrenagens

Os componentes existentes na caixa de potência foram idealizados para transferir movimento do veio do motor aos fusos da mini-extrusora. Assim, e de acordo com a escolha do motor e as dimensões do seu veio e da engrenagem, foi necessário idealizar um componente com o tamanho adequado aos requisitos referidos, que permitisse tal movimento. Na Figura 30 é possível observar o elemento projetado para esse fim.

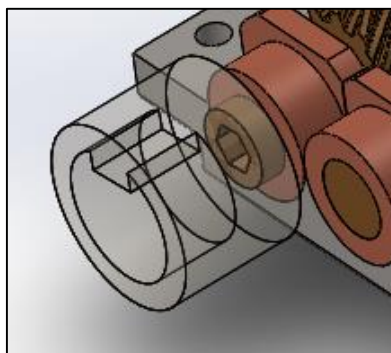


Figura 30 – Acoplamento veio do motor e engrenagens

Na Figura 31, apresenta-se uma segunda versão da mini-extrusora em projeto, após soluções construtivas realizadas até esta fase.

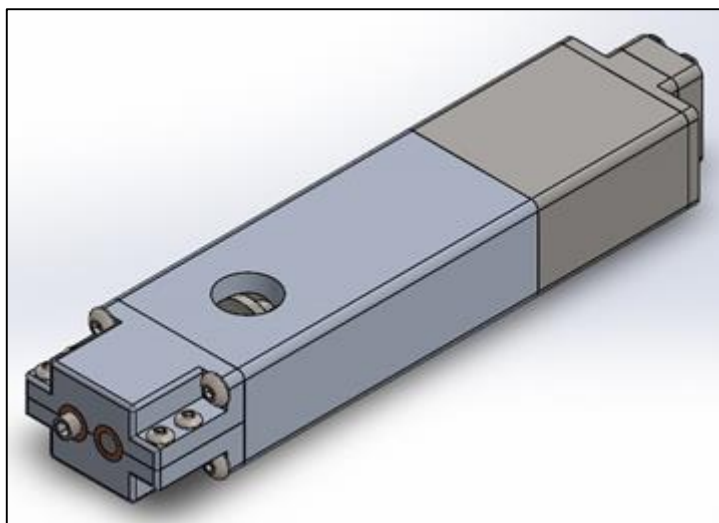


Figura 31 – Evolução do desenho da mini-extrusora

A investigação prosseguiu para a etapa de conceitualização da cabeça de extrusão e da fieira. Estando já as suas dimensões internas pré-definidas, o seu desenho foi concebido de forma a ser otimizado ao máximo o espaço disponível para a colocação destes dois elementos no conjunto da extrusora, sem prejudicar as zonas de aperto e colocação dos restantes componentes. Foi ainda importante nesta definição, a questão estética e o facto de se pretender construir um equipamento leve e modular. Assim, optou-se por se projetar uma solução do tipo mostrada na Figura 32.

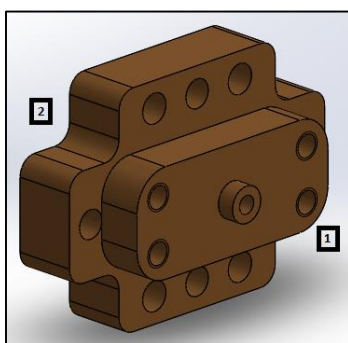


Figura 32 – Ilustração da fieira (1) e cabeça de extrusão (2)

Tendo sempre presente o objetivo que é a redução do peso final da extrusora, nas extremidades da cabeça de extrusão foi adotada uma configuração com os cantos “recortados”, bem visíveis na Figura 33. Com esta configuração procurou-se não interferir no aperto entre os módulos do cilindro. É possível verificar, ainda, pela mesma figura, que o *design* da fieira, também foi idealizado com o mesmo propósito.

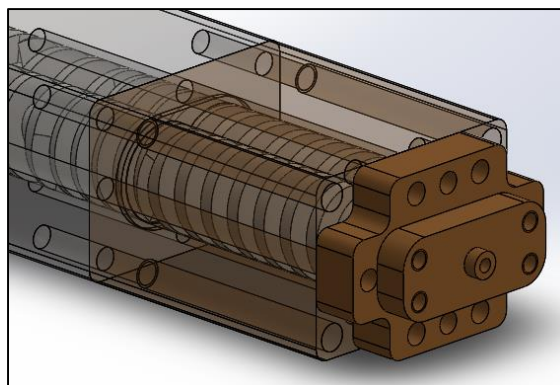


Figura 33 – Ilustração do acoplamento entre a cabeça de extrusão e fieira ao cilindro

Outro aspeto tido em conta na projeção do equipamento foi a colocação do termopar na extrusora. Na Figura 34 mostra-se a solução e o local encontrados para a sua localização.

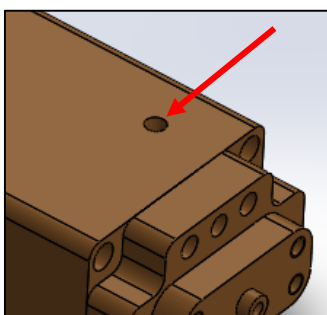


Figura 34 – Colocação do termopar

A colocação do termopar foi idealizado com o objetivo de não impedir a localização dos cartuchos de aquecimento e dos parafusos de aperto durante a construção da mini-extrusora. Outra razão, não menos importante, para a escolha da localização do termopar, foi procurar colocá-lo num local mais próximo da cabeça de extrusão e da fieira, de modo a que a temperatura estabelecida nessa zona fosse a indicada.

Para a alimentação da extrusora, a solução encontrada foi “copiada” das extrusoras convencionais, que usam um componente denominado tremonha. No entanto, para este caso em particular, teve-se em consideração as dimensões da mini-extrusora, pelo que se procurou desenhar uma tremonha de diâmetro suficientemente adequado à entrada de uma quantidade limitada de matéria-prima, para que não houvesse obstrução nos fusos. A obstrução do material pode provocar mau funcionamento e falhas durante a alimentação, resultando em fluxos de material não contínuos e alterações de débito. Na Figura 35 é mostrada a tremonha desenhada para a mini-extrusora e as dimensões da mesma.

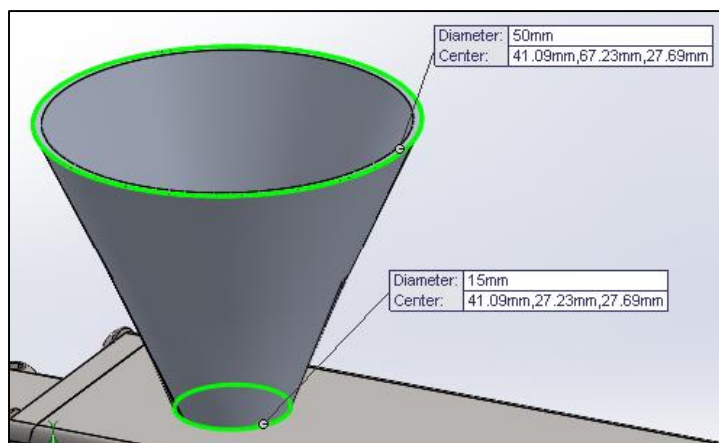


Figura 35 – Tremonha da mini-extrusora

Finalmente, com a conclusão desta última etapa, chegou-se ao modelo final da mini-extrusora que se pretende contruir, devidamente ilustrado na Figura 36.

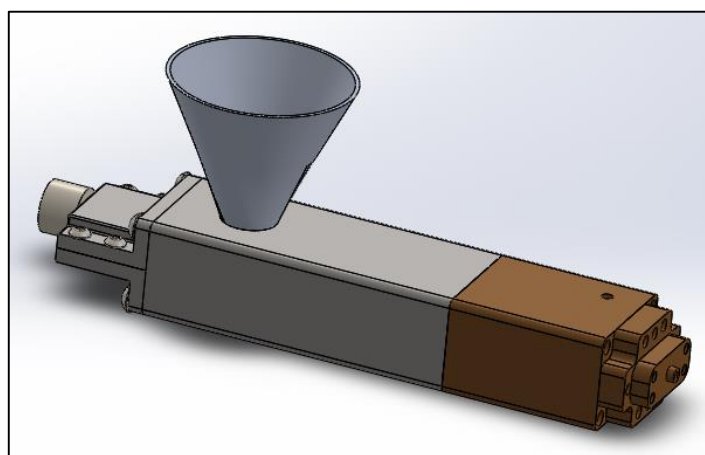


Figura 36 – Versão final da mini-extrusora

Sendo a prototipagem por FDM um dos temas inerentes ao projeto aqui desenvolvido, e tendo à disposição um equipamento, foi feito um protótipo, à escala 1:1, da mini-extrusora, com o intuito de verificar e compreender o que estaria a ser desenvolvido. Na Figura 37 apresenta-se em perspetiva os componentes devidamente montados da versão final da mini-extrusora.

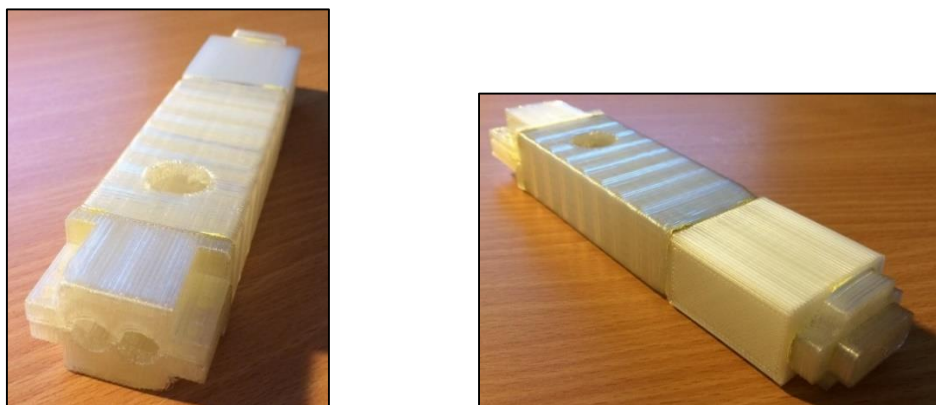


Figura 37 – Ilustração do protótipo final da mini-extrusora

Na Figura 38 apresenta-se uma imagem comparativa entre o tamanho do equipamento de FDM (ver Tabela 4) e o protótipo final da mini-extrusora.

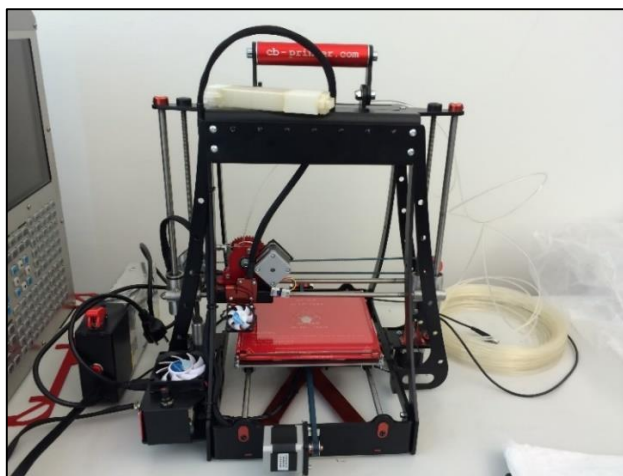


Figura 38 – Colocação do protótipo da mini-extrusora no equipamento de FDM *low cost*

3.6 Maquinagem dos componentes da extrusora

Após conclusão das diversas etapas que levaram à versão final da mini-extrusora, passou-se para a fase de maquinagem das peças que a constituem. Para concretizar esta etapa foi necessário encontrar uma empresa que assegurasse a maquinagem, num curto espaço de tempo, e garantisse a construção das peças com a precisão e tolerâncias recomendadas.

A empresa selecionada foi a “Neves e Neves – Metalomecânica”, empresa sediada em São Mamede do Coronado, Trofa. Esta empresa foi a que reuniu melhores condições para elaboração do trabalho tendo em conta os pressupostos exigidos para a execução do mesmo.

Na Figura 39 é apresentado o desenho da mini-extrusora com a legenda dos componentes que seguiram para maquinagem.

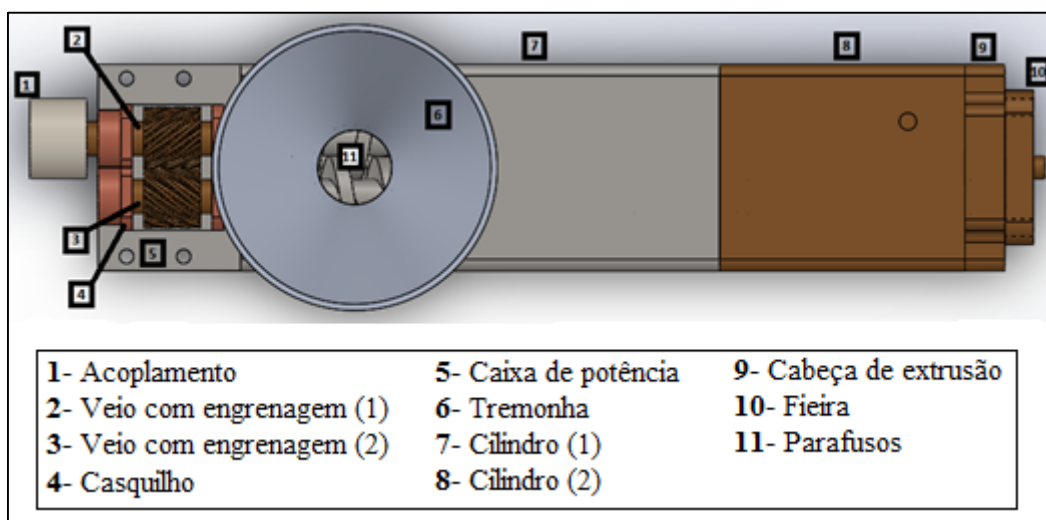


Figura 39 – Componentes constituintes da mini-extrusora que seguiram para maquinagem

As peças/componentes da mini-extrusora foram desenhadas em 3D com recurso ao *software* comercial *SolidWorks*®. Este *software* de CAD permite converter em desenhos 2D (desenho técnico) a partir dos desenhos 3D, de modo a serem corretamente interpretados pela empresa. No anexo II encontram-se os desenhos técnicos dos componentes legendados na Figura 39 enviados para a empresa de maquinagem.

É de referir que foi efetuada uma pesquisa de vários materiais destinados ao fabrico destes componentes, tendo em vista especificar qual o tipo que melhor se apropriava a cada um deles. Nesta investigação, foram avaliados o alumínio e o bronze. Estando implícitas altas temperaturas neste projeto, a utilização do alumínio iria influenciar diretamente o aquecimento do conjunto, devido às propriedades deste material. Este apresenta uma condutividade térmica (K) de 205 W/m.K a 25°C, o que é cerca do dobro, comparativamente com a do bronze (K= 109 W/m.K a 25°C) [30]. Assim, durante a extrusão, o calor iria ser rapidamente conduzido entre os componentes acoplados, provocando o amolecimento do material na tremonha, pondo em causa todo o processo de plasticização. O alumínio é também um material com um coeficiente de expansão térmica (α) superior ao bronze ($\alpha_{Al} = 23,1 \cdot 10^{-6}/K$ a 20°C; $\alpha_{Br} = 19 \cdot 10^{-6}/K$ a 20°C) [31], podendo provocar a expansão do material dos componentes, aquando do aquecimento destes, podendo originar inclusive a quebra de elementos, nomeadamente dos parafusos de aperto, dos parafusos da extrusora, entre outros.

De seguida indica-se o tipo de material usado para a maquinagem dos componentes:

- 1- Acoplamento (Aço – 1.2738);
- 2- Veio com engrenagem 1 (BOZD – 1.6582);
- 3- Veio com engrenagem 2 (BOZD – 1.6582);
- 4- Casquilho (Bronze);
- 5- Caixa de potência (Aço – 1.2738);
- 6- Tremonha (Alumínio – 5083);
- 7- Cilindro 1 (Aço – 1.2738);
- 8- Cilindro 2 (Bronze especial – 2.0940);
- 9- Cabeça de extrusão (Bronze especial – 2.0940);
- 10- Fieira (Bronze especial – 2.0940);
- 11- Fusos (BOZD – 1.6582).

No anexo III apresentam-se as fichas técnicas dos materiais utilizados na fabricação dos componentes.

3.7 Apresentação da mini-extrusora

Após realizada a maquinagem dos componentes e depois de adquiridos todos os elementos normalizados, foi possível montar o conjunto da mini-extrusora, como ilustrado pelas Figuras 40, 41 e 42.

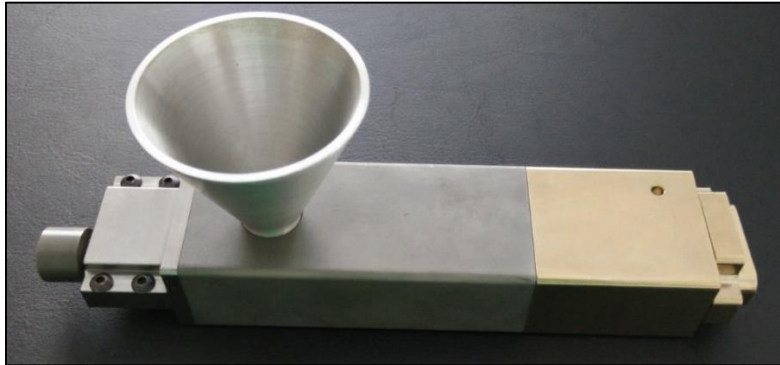


Figura 40 – Mini-extrusora (1)

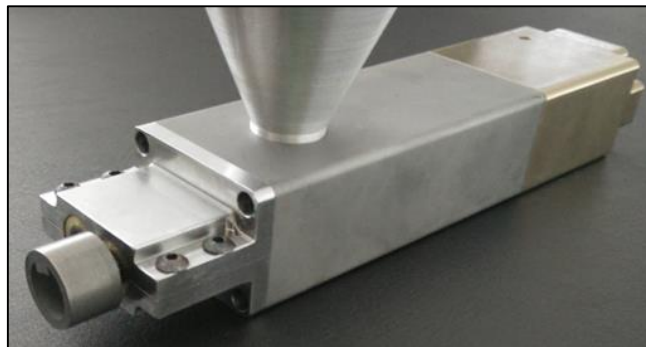


Figura 41 – Mini-extrusora (2)

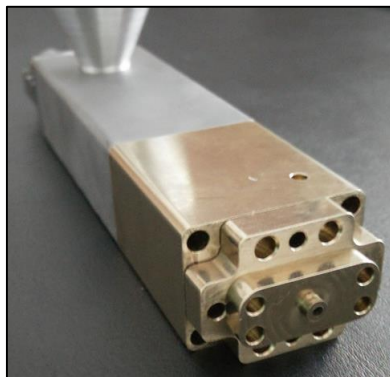


Figura 42 – Mini-extrusora (3)

Na Figura 43 são apresentados os fusos e na Figura 44 o sistema de transmissão de movimento no interior da caixa de potência.



Figura 43 – Fusos da mini-extrusora

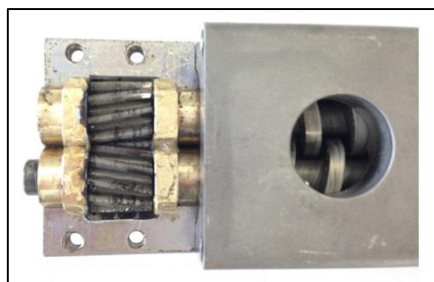


Figura 44 – Sistema de transmissão de potência presente na caixa de potência

Após apresentada a mini-extrusora, realçam-se as principais características do equipamento:

1- Dimensões

Um dos requisitos deste projeto era a construção de uma mini-extrusora de dimensões reduzidas. De modo a evidenciar as reais dimensões do equipamento, na Figura 45 apresenta-se uma ilustração da mini-extrusora junto a uma moeda de 1€.



Figura 45 – Mini-extrusora comparada com moeda de 1€

Recorrendo a uma régua, a mini-extrusora é apresentada na Figura 46 sob uma perspetiva que permite visualizar o seu comprimento, podendo-se afirmar que a extrusora é de facto um equipamento de dimensões reduzidas.



Figura 46 – Medida do comprimento da mini-extrusora

2- Peso

O peso final do conjunto da mini-extrusora é aproximadamente de 900g.

3- Modular

Outra das especificações seria a construção de um produto modular. Na Figura 47 apresentam-se duas imagens que ilustram o conceito de modularidade aplicado na mini-extrusora.



(1)



(2)

Figura 47 – Ilustração da modularidade da mini-extrusora (1) e (2)

4- Possibilidade de extrudir qualquer tipo de material polimérico

Finalmente, a especificação mais importante seria a construção de um equipamento que extrudisse qualquer tipo de material polimérico em forma de granulado ou pó. Na Figura 48 é apresentada uma imagem durante a extrusão de um material polimérico em forma de granulado.



Figura 48 – Figura ilustrativa da alimentação da mini-extrusora

Capítulo 4 – FASE EXPERIMENTAL

Para comprovar se de facto a mini-extrusora era um equipamento eficaz, e cumpria todos as etapas consideradas necessárias para efetuar um processo de plasticização homogêneo, realizaram-se várias experiências.

A primeira experiência foi verificar se o sistema funcionaria, ou seja, se a mini-extrusora seria capaz de aceitar, e fazer avançar a matéria-prima, ao longo do comprimento total do canal de escoamento. Através da Figura 49 é possível verificar que a mini-extrusora cumpre a sua função, isto é, plasticiza o polímero em forma de grânulo e produz um filamento com diâmetro consistente.



Figura 49 – Mini-extrusora a extrudir

Porém, a extrusão não é um simples processo de alimentação, aquecimento e saída de material pela fiação. Durante este processo, é necessário ainda, controlar outras variáveis, como a temperatura, a velocidade de rotação dos fusos, a correta alimentação da extrusora, entre outras, de modo a avaliar a eficiência do equipamento dimensionado e desenvolvido ao longo deste estudo.

4.1 Apresentação de resultados

Para perceber se de facto a mini-extrusora trabalhava de forma controlada, e se as propriedades do extrudido se coadunavam com o pré-definido, iniciou-se a segunda fase de experiências. O objetivo era estudar o débito da máquina com a finalidade de avaliar o comportamento da extrusora ao longo do tempo. Esta variável é caracterizada pela quantidade de massa extrudida, durante uma unidade de tempo, no caso em concreto medida em [g.min].

Assim, para comprovar este fenómeno, foi delineado um plano de experiências. Este plano consistia na extrusão de três materiais poliméricos diferentes, retirando amostras de minuto em minuto (durante 5 minutos), a três temperaturas diferentes e a três velocidades de rotação dos

fusos também diferentes. Na Tabela 13 é possível acompanhar o plano de experiências, onde se apresentam os três materiais utilizados (LDPE, HDPE em grânulo e PE em pó), as velocidades estabelecidas de rotação dos fusos (10, 15 e 20 rpm) e as temperaturas definidas de acordo com a temperatura de processamento do material (determinado a partir das fichas técnicas dos materiais a extrudir presentes no anexo IV no final desta dissertação).

Tabela 13 - Tabela com programa de experiências a realizar

Material	LDPE (Lupolen® 2426H)								
Velocidade de rotação dos fusos [rpm]	10			15			20		
Temperatura [°C]	170	190	210	170	190	210	170	190	210
Material	HDPE (Borealis® BS2581)								
Velocidade de rotação dos fusos [rpm]	10			15			20		
Temperatura [°C]	230	240	250	230	240	250	230	240	250
Material	PE em “pó” (3583UV)								
Velocidade de rotação dos fusos [rpm]	10			15			20		
Temperatura [°C]	170	190	210	170	190	210	170	190	210

Após o arranque da extrusora e colocação do material na tremonha, começou-se a estudar o débito, tendo-se verificado uma variação de valores na ordem de 1g, situação não recomendada. Tendo em conta este acontecimento, colocou-se a hipótese que tal situação poderia ter origem na alimentação do material na zona da tremonha, causada pelo seu amolecimento e consequente obstrução, o que provocava uma entrada deficiente do material no cilindro.

Para solucionar este problema efetuou-se, com a ajuda de um leitor portátil, um estudo de medição das temperaturas em locais específicos da mini-extrusora, indicadas nas Figuras 50, 51 e 52. De maneira a avaliar qual a melhor opção para corrigir este problema, foram consideradas três situações:

1- Conjunto sem arrefecimento, com uma temperatura definida de 200°C, e com os cartuchos totalmente inseridos no local escolhido inicialmente.

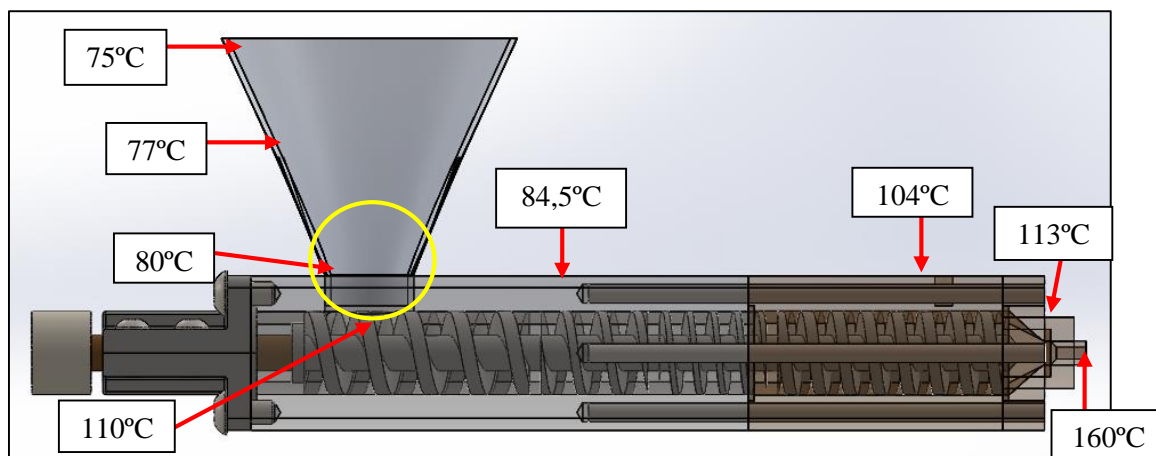


Figura 50 – Situação sem arrefecimento, temperatura 200°C e cartuchos totalmente inseridos

Nesta situação, verificou-se o amolecimento do material na zona da tremonha, junto à entrada, no cilindro.

2- Conjunto sem arrefecimento, com uma temperatura definida de 200°C, e com as resistências tipo cartucho fora 10mm do local escolhido inicialmente.

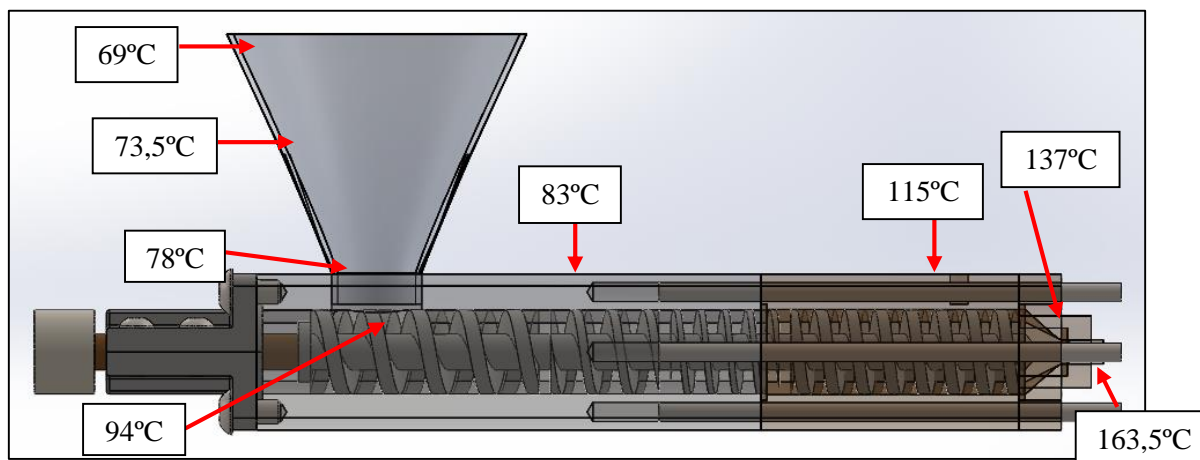


Figura 51 - Situação sem arrefecimento, temperatura 200°C e cartuchos fora 10mm

Nesta situação, verificou-se que o material não amolece na zona da tremonha, junto à entrada, no cilindro.

3- Conjunto com arrefecimento a partir de uma ventoinha, com uma temperatura definida de 200°C, e com as resistências tipo cartuchos totalmente inseridas no local escolhido inicialmente.

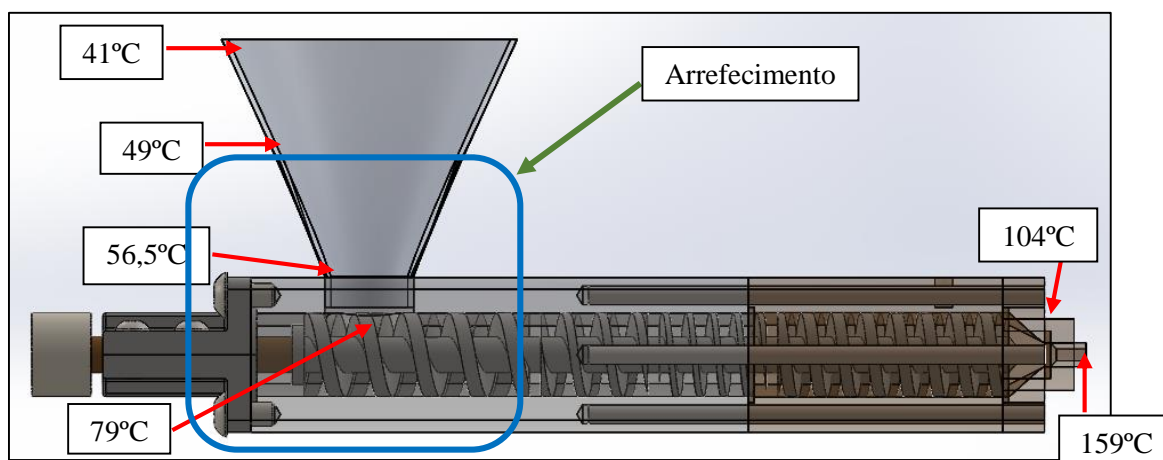


Figura 52 - Situação com arrefecimento, temperatura 200°C e cartuchos totalmente inseridos

Nesta situação, verificou-se também, que o material não amolece na zona da tremonha, junto à entrada, no cilindro.

Devido ao facto do material não amolecer, a segunda e a terceira hipóteses seriam as ideais para efetuar as experiências necessárias à avaliação do correto funcionamento da extrusora. No entanto, acabou-se por excluir a segunda, porque ao colocar os cartuchos de aquecimento 10 mm fora do local escolhido para a sua posição pré-definida, o extrudido iria cair em cima destes elementos, optando-se por isso, pela terceira hipótese, como se depreende da Figura 53.

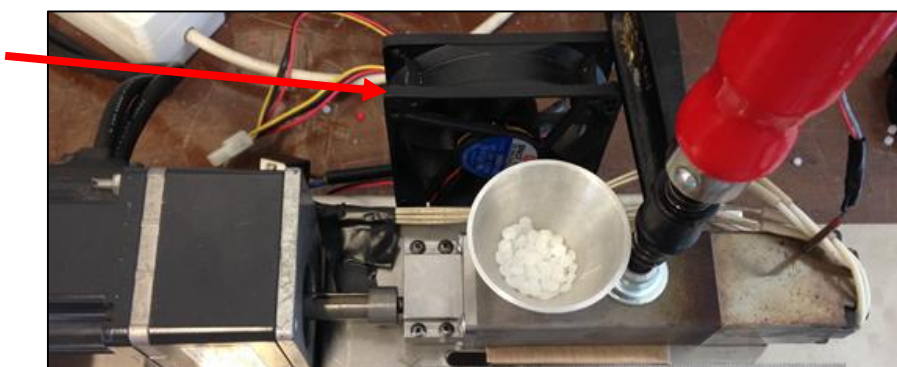


Figura 53 - Colocação da ventoinha para arrefecimento da tremonha e zona de alimentação

Foi assim possível recomençar a realização do plano de experiências da Tabela 13, com o intuito de avaliar o débito da máquina. Nos Gráficos 1, 2 e 3 apresentam-se os valores dos débitos obtidos ao longo do tempo definido inicialmente (5 minutos):

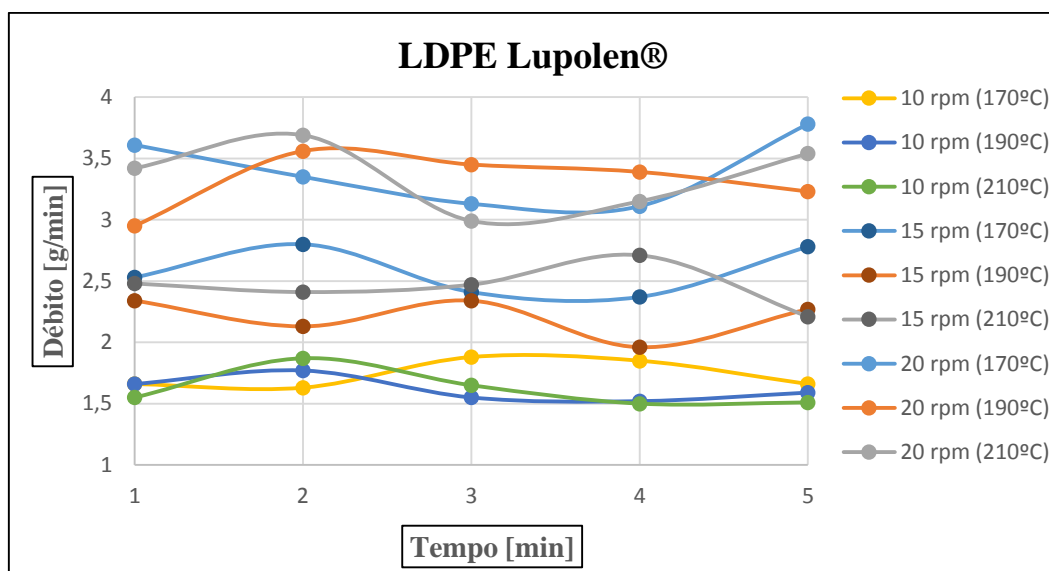


Gráfico 1 – Evolução do débito ao longo do tempo para o caso do LDPE

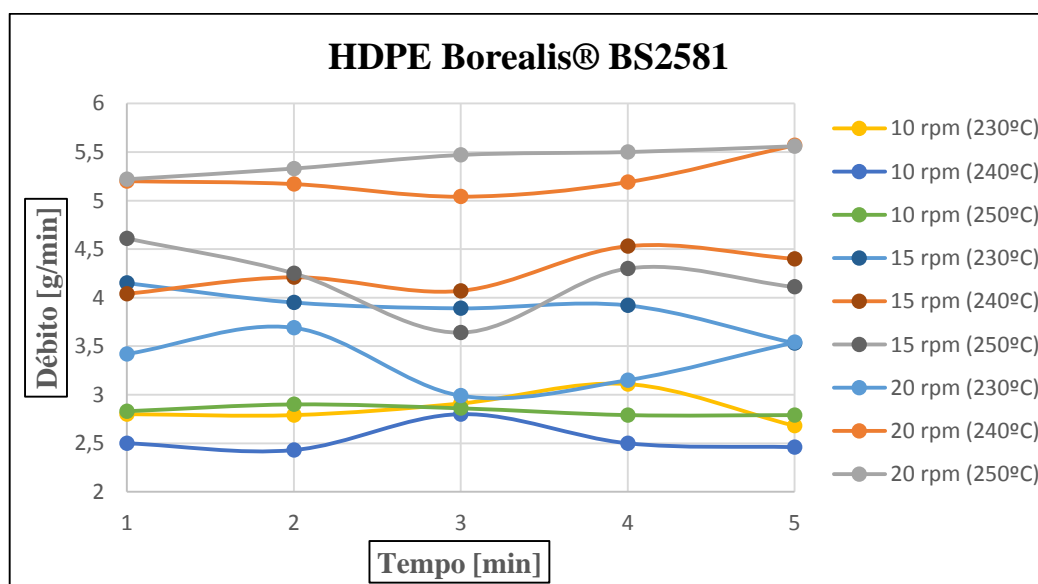


Gráfico 2 – Evolução do débito ao longo do tempo para o caso do HDPE

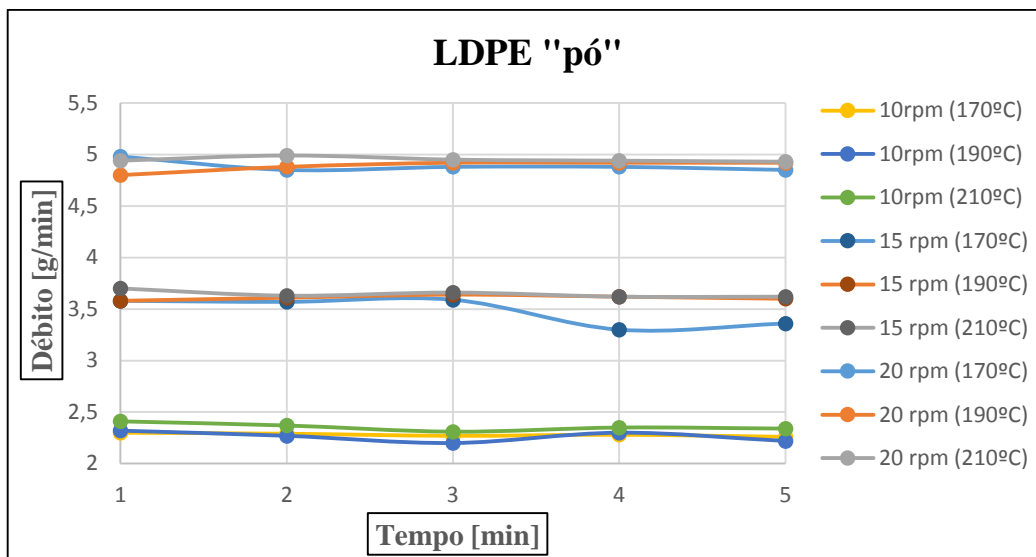


Gráfico 3 – Evolução do débito ao longo do tempo para o caso do LDPE em “pó”

Por último, foram retirados os fusos da mini-extrusora de modo a avaliar o comportamento do material nas suas diferentes zonas, e consequentemente verificar se o seu dimensionamento foi executado corretamente.

Representam-se, de seguida, através das Figuras 54, 55 e 56, as várias perspetivas de visualização dos fusos.



Figura 54 – Vista posterior dos fusos da mini-extrusora

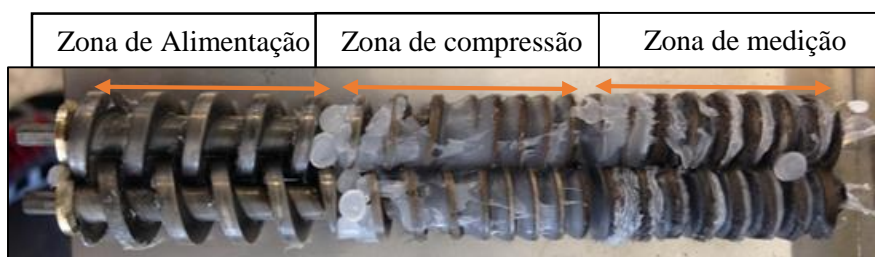


Figura 55 – Vista inferior dos fusos da mini-extrusora



Figura 56 – Vista frontal dos fusos da mini-extrusora

4.2 Discussão de resultados

Como se pode analisar pelos Gráficos 1, 2 e 3 representados acima, para os três materiais estudados, é notório um aumento do débito à medida que se aumenta a rotação dos fusos, e uma variação pouco significativa do débito à medida que se aumenta a temperatura da extrusora, pelo uso de um equipamento de duplo-fuso contra-rotativo de acordo com o levantamento efetuado no estado-da-arte.

Por outro lado, pode-se dizer que a mini-extrusora, aparenta ser eficaz, quando apresenta uma zona de alimentação do material controlada, isto é, não aquecida pela condução de calor do material dos componentes proveniente dos cartuchos de aquecimento, de acordo com a terceira hipótese verificada no subcapítulo anterior.

No entanto, alguns dos valores apresentados graficamente, mostram um desvio da tendência esperada, como foi o caso verificado no Gráfico 2 no HDPE, quando ao aumentar a velocidade de rotação dos fusos, se detetou uma diminuição do débito. Estes fenómenos poderão estar relacionados com a alimentação da extrusora. As extrusoras de duplo-fuso contra-rotativas industriais, apresentam um doseador através do qual é realizada a alimentação devidamente controlado do processo de extrusão. No caso da mini-extrusora em estudo, a alimentação é executada de forma manual, pois ao ser adicionado um doseador, iria aumentar o seu peso, o que não se pretende. Por esse motivo, admite-se que a alimentação possa não ter sido perfeita ao longo dos testes efetuados. Entende-se por perfeita, a colocação da mesma quantidade de material de cada vez, de modo a não prejudicar o débito, pois o efeito da gravidade e da pressão criado podem influenciar a quantidade de material que entra no cilindro, provocando diferenças de fluxo do material à saída da fieira. Assim, estando o doseamento da alimentação da mini-extrusora diretamente relacionado com o débito nestes equipamentos, admite-se que tal situação possa ter influenciado os valores finais obtidos para o débito.

Outra situação verificada ao longo das experiências efetuadas foi a quebra, na posição assinalada na Figura 57, por duas vezes, do componente que estabelece o acoplamento entre o veio do motor e o veio das engrenagens.

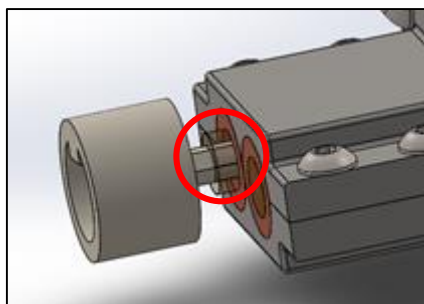


Figura 57 – Local da quebra

Foi indispensável compreender a causa desta situação. O pressuposto era de que o problema provinha do não controlo da temperatura do material junto à fiação, situação não aceitável quando se pretende construir um equipamento eficaz e controlado, uma vez que os cartuchos de aquecimento se encaixavam no conjunto “apenas” na cabeça de extrusão, como se pode comprovar pela Figura 33. Tal situação provoca um desfasamento de temperaturas entre este módulo e a fiação, já que esta é aquecida somente por condução de calor, por estar acoplada à cabeça de extrusão. Este fator seria provavelmente o suficiente para criar um arrefecimento do material à saída da fiação, obrigando o motor a fazer mais força, o que provocou a quebra do componente que une esses dois elementos.

Por último, é apresentada uma análise do que acontece em cada uma das zonas geométricas dos fusos da mini-extrusora (Figuras 54, 55 e 56):

- 1- Zona de alimentação: verifica-se que o material progride ao longo desta zona sem fundir completamente, sendo ainda visíveis alguns grânulos sólidos no final desta zona. Pode-se considerar que relativamente a esta zona o L/D do fuso foi acertado;
- 2- Zona de compressão: no início desta zona, os grânulos que aqui se encontram, vão fundindo progressivamente, por ação do aquecimento do cilindro, e da posição dos cartuchos de aquecimento. É possível verificar ainda que à medida que se avança nesta zona, as câmaras em “C” dos fusos, começam a ficar parcialmente cheias, fenómeno importante para o desenvolvimento do fundido ao longo do comprimento do canal de escoamento;
- 3- Zona de medição: nesta zona, o material encontra-se totalmente fundido, e por consequência as câmaras em “C” dos fusos completamente cheias.

Nota: Na Figura 56 é visível a presença, na zona de medição, de um grânulo que se colou aos fusos, de forma causal, aquando da retirada e colocação destes na plataforma para serem analisados e fotografados.

A partir desta análise, considera-se que o L/D dos fusos foi dimensionado corretamente, devido à sequência do desenvolvimento sofrido pelo fundido ao longo do comprimento total dos parafusos. De acordo com a Figura 56, conclui-se, ainda, que o material tem tendência para se deslocar mais na zona inferior, do que na zona superior dos fusos.

Capítulo 5 - CONCLUSÃO

Após análise e discussão dos resultados, é possível concluir que o objetivo proposto foi alcançado. Chega-se a esta conclusão porque o resultado final demonstra que se desenvolveu uma extrusora de dimensões reduzidas, que permite extrudir qualquer tipo de material polimérico em forma de granulado ou pó, transformando-o em filamento, podendo este ser usado na alimentação do equipamento FDM *low cost*, contribuindo para a redução dos custos intrínsecos dos modelos atuais de Prototipagem Rápida, tendo em conta o preço praticado nas bobines de material utilizadas. Concluiu-se, ainda, que as especificações propostas para o desenvolvimento da extrusora foram todas atingidas.

O trabalho experimental demonstrou que surgiram alguns problemas durante a extrusão. Um desses problemas prendeu-se com o aquecimento do material polimérico na zona de alimentação, provocando o seu amolecimento e conseqüente obstrução na entrada do cilindro, originando um débito inconstante. Outro problema identificado foi o facto de, as temperaturas na zona da fieira não estarem controladas, o que provocou a quebra do componente que promove a ligação entre o veio do motor e a engrenagem.

Neste momento, não existe no conceito apresentado, um módulo projetado para acoplar a mini-extrusora ao equipamento de FDM. Espera-se que no futuro se venha a encontrar uma solução para resolver este obstáculo.

Finalmente é de salientar que se encontra em curso a submissão de uma patente do conceito, com o objetivo de preservar a ideia e salvaguardar os direitos de propriedade intelectual.

Capítulo 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do trabalho foram tomadas opções que determinaram um caminho a seguir para o desenvolvimento da extrusora. Poderiam ter sido tomadas outras, com o intuito de encontrar resultados que permitissem abrir novos percursos de investigação. Assim, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros, de modo a complementar o projeto realizado, nomeadamente:

- Substituir uma parte em aço do cilindro da extrusora, por um módulo em cerâmica que isole a zona de alimentação, e permita resolver os problemas de condução de calor e de amolecimento do material polimérico nesta zona.

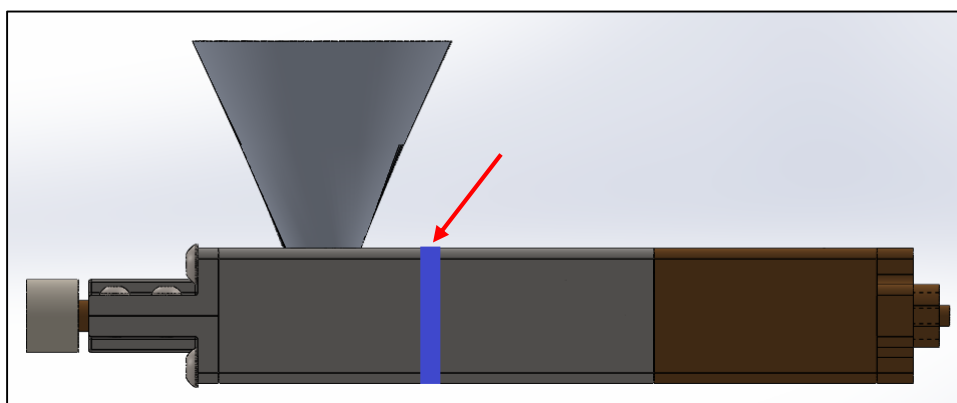


Figura 58 – Localização do módulo em cerâmica na zona da alimentação

- Redesenhar a fieira de forma a acoplar os cartuchos de aquecimento, tornando possível o controlo da temperatura nesse componente. Salienta-se que, ao adotar esta solução, os cartuchos de aquecimento recuam 7mm (comprimento da fieira), melhorando a eficiência da extrusora.



Figura 59 – Fieira preconizada no conceito inicial

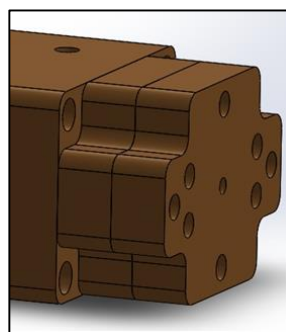


Figura 60 – “Nova” fieira a maquinar

- Colocar à saída da fieira um sistema de arrefecimento para o extrudido, uma vez que esse material necessita de ser arrefecido para ser utilizado na alimentação dos equipamentos de FDM. A solução poderia eventualmente passar por projetar um tapete rolante para encaminhamento do material para um sistema de enrolamento do filamento, com um mecanismo para arrefecimento do mesmo.

- Disponibilizar este equipamento no mercado, em forma de *kit* funcional e modular, para upgrade de qualquer modelo de equipamentos de FDM *low cost*, proporcionando aos utilizadores a possibilidade de utilizarem materiais além dos limitados pela FDM, de acordo com as características que pretendam fabricar relativamente a materiais, cores ou soluções idealizadas para esses modelos.

- Utilizar a tabela abaixo para avaliação da possibilidade de encontrar vantagens para a substituição do extrusor do equipamento de FDM comparativamente com a solução preconizada neste projeto utilizando a mini-extrusora desenvolvida.

Tabela 14 - Vantagens e desvantagens das soluções

Solução preconizada no estudo em questão	“Substituição do extrusor do equipamento FDM <i>low cost</i>”
Dois ciclos térmicos no mínimo;	Apenas um ciclo térmico;
Regulação do aquecimento fácil;	Regulação do aquecimento mais difícil;
Arrefecimento do material à saída da fieira com um sistema de arrefecimento a desenvolver;	Arrefecimento do material à saída da fieira mantendo as ventoinhas do equipamento de FDM;
Usar mais 2 unidades de controlo – temperaturas e velocidade de rotação dos fusos;	Não é necessário usar mais unidades de controlo;
Fieira com diâmetro de 2mm;	Fieira com diâmetro de 0,2mm;
Adquirir uma unidade de potência válida para as 2 soluções;	Adquirir uma unidade de potência válida para as 2 soluções;
Acoplamento direto da unidade de potência;	Utilização de um veio flexível para transmissão de potência desde o motor ao acoplamento das engrenagens da mini-extrusora;
Fieira na horizontal (normal);	Fieira deve ser redesenhada na vertical para deposição do material;
Maior facilidade na colocação da extrusora, sendo apenas necessário adquirir duas unidades de controlo (temperatura e velocidade de rotação dos fusos);	Dificuldade na substituição do extrusor devido à complexidade do <i>hardware</i> e <i>software</i> , sendo necessário reprogramar o sistema, para se adaptar à mini-extrusora;
Uniformização do diâmetro do filamento importante, devido ao diâmetro necessário presente no extrusor original do equipamento FDM.	Uniformização do diâmetro do filamento não importante – direto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] iMakr. PLA 2.85 mm Filament [em linha]. United Kingdom [revisto em Fevereiro 2014]
Disponível em URL: <http://www.imakr.com/19-filament>;
- [2] Plastiker “The home of plastics”. Real-Time Price Comparison List / Price- and Quantity Statistics [em linha]. Germany [revisto em Outubro 2014]
Disponível em URL: http://plasticker.de/preise/index_en.php;
- [3] 3D Printing.com. What is 3D printing? [em linha]. United States of America [revisto em Março 2014]
Disponível em URL: <http://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>;
- [4] Professor António Pontes in Projeto com Plásticos - “Prototipagem Rápida e Fabrico Rápido de Ferramentas”;
- [5] Stratsys. The Invention of FDM Technology [em linha]. United States of America [revisto em Outubro 2013]
Disponível em URL: <http://www.stratsys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology>;
- [6] CUSTOMPART.NET. Fused Deposition Modeling [em linha] United States of America (revisto em Outubro 2014)
Disponível em URL www.custompartnet.com;
- [7] 3D Prototypes and Models. 3D PRINTING MATERIALS, TERMINOLOGY AND SPECIFICATIONS [em linha] Australia (revisto em Outubro de 2014)
Disponível em URL: <http://3dprototypesandmodels.com.au/3d-printing-terminology-specifications/>;
- [8] iMakr. Colour Change Filament 1.75mm PLA [em linha]. United Kingdom (revisto em Outubro de 2014)
Disponível em URL: <http://www.imakr.com/filament/34-colour-change-filament-175mm-pla.html>;
- [9] Make Parts Fast. A closer look at extrusion-based 3D printers [em linha]. United States of America (revisto em Outubro de 2014)
Disponível em URL: <http://www.makepartsfast.com/2012/05/3734/a-closer-look-at-extrusion-based-3d-printers/>;
- [10] Stratsys. The Invention of FDM Technology [em linha]. United States of America [revisto em Outubro 2013].
Disponível em URL:
http://www.stratsys.com/~media/Main/Secure/White%20Papers/Rebranded/SSYS_WP_3d_printing_with_fdm.pdf;

- [11] Particle Sciences. Hot Melt Extrusion [em linha] United States of America (revisto em 2014)
Disponível em: <http://www.particlesciences.com/news/technical-briefs/2011/hot-melt-extrusion.html>;
- [12] Chris Rauwendall, in *Polymer Extrusion*, Hanser Gardner Pubns (2nd edition), 1986;
- [13] Harold F. Giles, Jr., Eldridge M. Mount III, John R. Wagner, Jr in *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*, Plastics Design Library, 2007;
- [14] Kruder GA. Extrusion. In: *En-cyclopedia of Polymer Science and Engineering* Vol. 1, 2nd ed. John Wiley & Sons Inc., New York (1985) 571-631.
- [15] Crowley MM, Zhang F, Repka MA, Thumma S, Upadhye SB, Battu SK, McGinity JW, Martin C. Pharmaceutical Applications of Hot Melt Extrusion: Part I. *Drug Dev Ind Pharm* (2007) 33(9):909-926.;
- [16] L.P.B.M Janssen, in *Twin Screw Extrusion*, Elsevier Science Ltd, 1977;
- [17] D.J. van Zuilichem, W.Stolp e L.P.B.M Janssen, “Engineering Aspects of Single- and Twin-screw Extrusion-cooking of Biopolymers*”, *Journal of Food Engineering* 2, 1983, 157-175;
- [18] CB-Printer. 3D Printer CB-printer.com [em linha] Poland (revista em Outubro 2013)
Disponível em URL: <http://cb-printer.com/en/shop/3d-printer-cb-printer-com/>;
- [19] Inforçatti Neto, PY Noritomi, JVL Silva, MS Freitas, ZC Silveira, “Development of an interchangeable based on variable section screw applied to desktop 3-D printers”, in *High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013;
- [20] GEM-Chem. Twin Screw Extruders for the compounding of engineering thermoplastics [em linha]. United Kingdom (revisto em Maio 2014)
Disponível em URL: <http://www.gem-chem.net/machinerytse.html>;
- [21] Wikipedia. Motor de passo [em linha] (revista em Novembro de 2013)
Disponível em URL: http://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_de_passo;
- [22] Oriental Motor. Stepper Motor - High-Torque Stepper Motors 1.8°/0.9°/Geared (PKP) [em linha] Japan (revisto em Outubro 2014)
Disponível em URL:
http://www.orientalmotor.eu/Products/Stepper_motors/Stepper_motors/high_torque_2phase_motors_pkp/?&filter1=Standard&filter2=42+mm&arid=7989&dwn=artnr;
- [23] Eisenbeiss. Gear systems for conical counter-rotating extruders [em linha]. Germany (revisto em Julho de 2014)
Disponível em URL: <http://www.eisenbeiss-industrial-gear.com/industrial-gearing-solutions/conical-counter-rotating-extruder-gear-system/>;

- [24] Bright Hub Engineering. Helical Gears vs. Spur Gears [em linha] (revisto em Setembro de 2014)
Disponível em URL: <http://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/33535-helical-gears-vs-spur-gears/>;
- [25] Lanema. Casquilhos de bronze [em linha]. Portugal (revisto em Setembro de 2014)
Disponível em URL: http://www.lanema.pt/produtos_normalizados2.php?id=65&lang=1;
- [26] Watlow. Cartridge Heaters [em linha]. United States of America (revisto em Abril de 2014)
Disponível em URL: <http://www.watlow.com/products/heaters/index.cfm>;
- [27] Omega. Cartridge Heaters [em linha]. United Kingdom (revisto em Abril de 2014)
Disponível em URL: http://www.omega.com/Heaters/pdf/HDC19100_Series.pdf;
- [28] Omega. Cartridge Heaters [em linha]. United Kingdom (revisto em Abril de 2014)
Disponível em URL: http://www.omega.co.uk/pptst/HDC19100_Series.html;
- [29] Resitec. Sondas de temperature [em linha] Portugal (revisto em Abril de 2014)
Disponível em URL:
http://www.resitec.pt/files/_catalogo_sondas_web__541ffd57b6b80.pdf;
- [30] The Engineering Toolbox. Thermal Conductivity of some common Materials and Gases [em linha]. (revisto em Outubro de 2014)
Disponível em URL: http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html;
- [31] Wikipedia. Thermal Expansion [em linha] (revisto em Outubro de 2014)
Disponível em URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion.

ANEXO I – Dimensões do motor de passo

■ Dimensions (Unit = mm)

Product Name	Motor Product Name	L1	L2	Mass kg
PKP243D15A-L	PKP243D15A	33	-	0.25
PKP243D15B-L	PKP243D15B		48	
PKP244D15A-L	PKP244D15A	39	-	0.3
PKP244D15B-L	PKP244D15B		54	
PKP245D15A-L	PKP245D15A	47	-	0.39
PKP245D15B-L	PKP245D15B		62	
PKP246D15A-L	PKP246D15A	59	-	0.5
PKP246D15B-L	PKP246D15B		74	

● Applicable Connector
Connector Housing: 51103-0600 (Molex)
Contact: 50351-8100 (Molex)
Crimp Tool: 57295-5000 (Molex)

The technical drawing shows two views of the connector. The side view (left) indicates overall length L1 and L2, contact pitch of 1.5mm, and specific dimension callouts like 15±0.15, 20±1, 15±0.25, 4.5±0.15, 4.5±0.12 (h7), and 4.5±0.033 (h6). It also shows a shaded area representing the shaft flat. The front view (right) shows a circular housing with a diameter of 42mm, mounting holes at 31±0.2mm from the center, and a depth of 42mm. A note specifies 4×M3×4.5 Deep for the mounting holes.

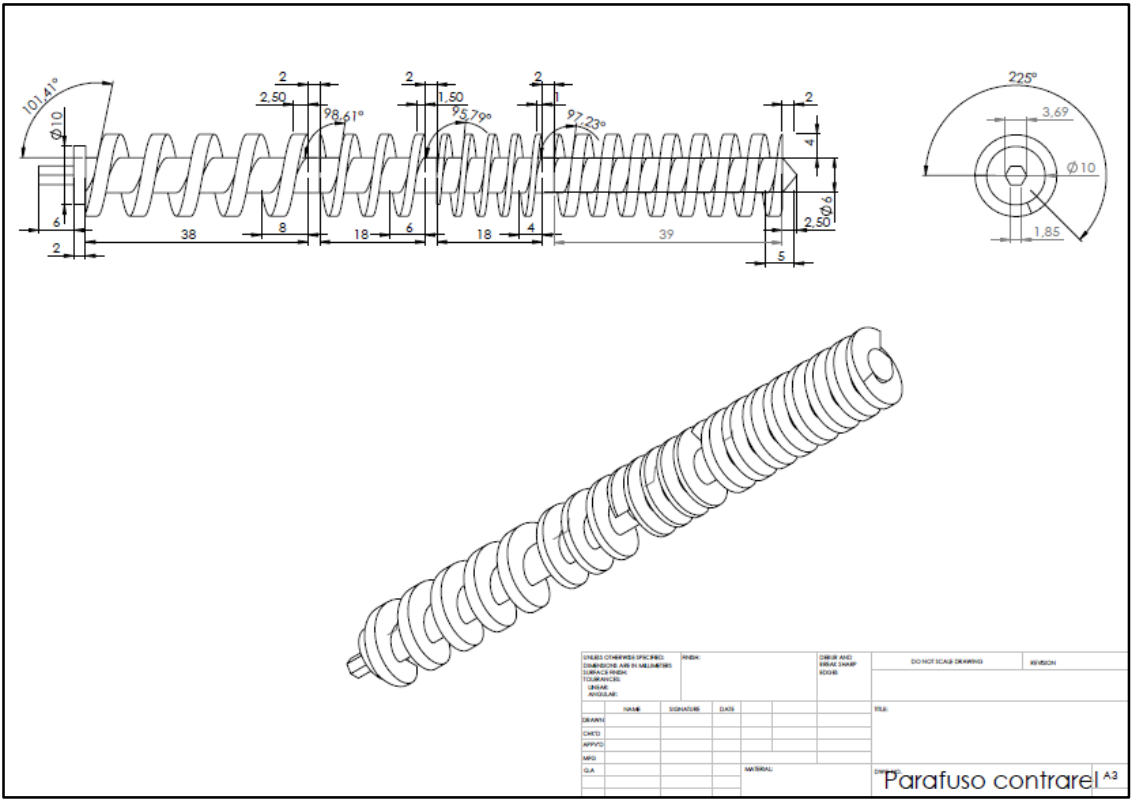
* The length of the shaft flat on the double shaft model is 15±0.25.
* These dimensions are for double shaft models.
For single shaft models, ignore the shaft in the shaded areas.

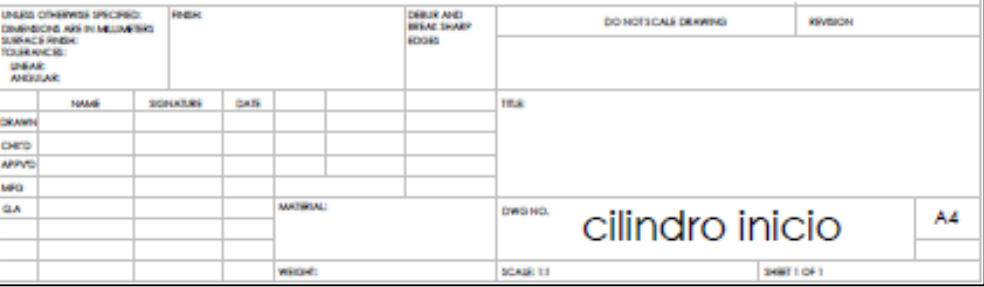
● Included
Connection Cable
Product Name: LC2B068

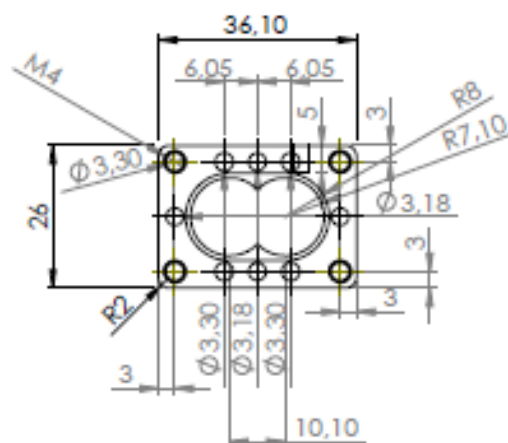
The drawing shows a cable with a total length of 600mm. One end features a Molex 51103-0600 connector. The other end has four individual motor leads. A note specifies the cable meets UL Style 3265, AWG24 standards.

http://www.orientalmotor.eu/Products/Stepper_motors/Stepper_motors/high_torque_2phase_motors_pkp/?&filter1=Standard&filter2=42+mm&arid=7989&dwn=artnr

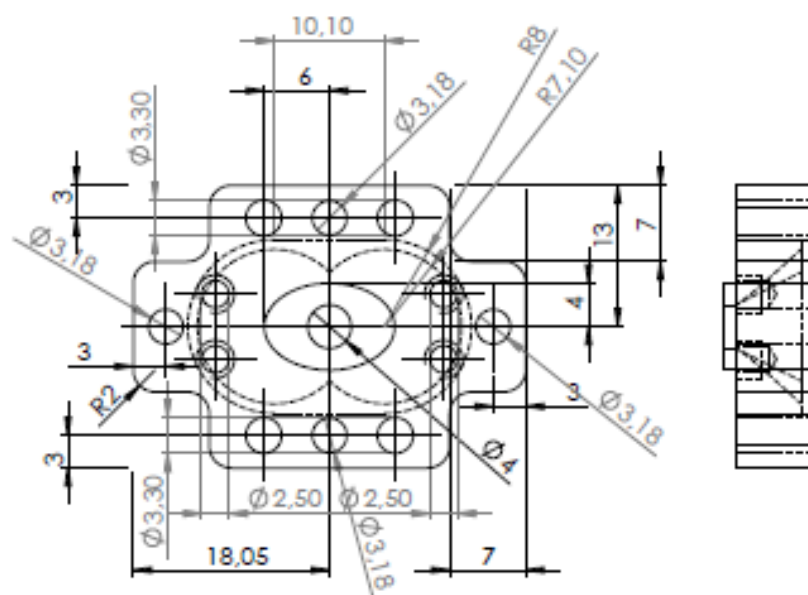
ANEXO II – Desenhos técnicos dos componentes enviados para maquinação



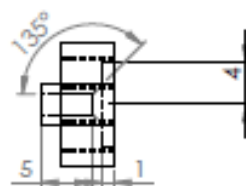




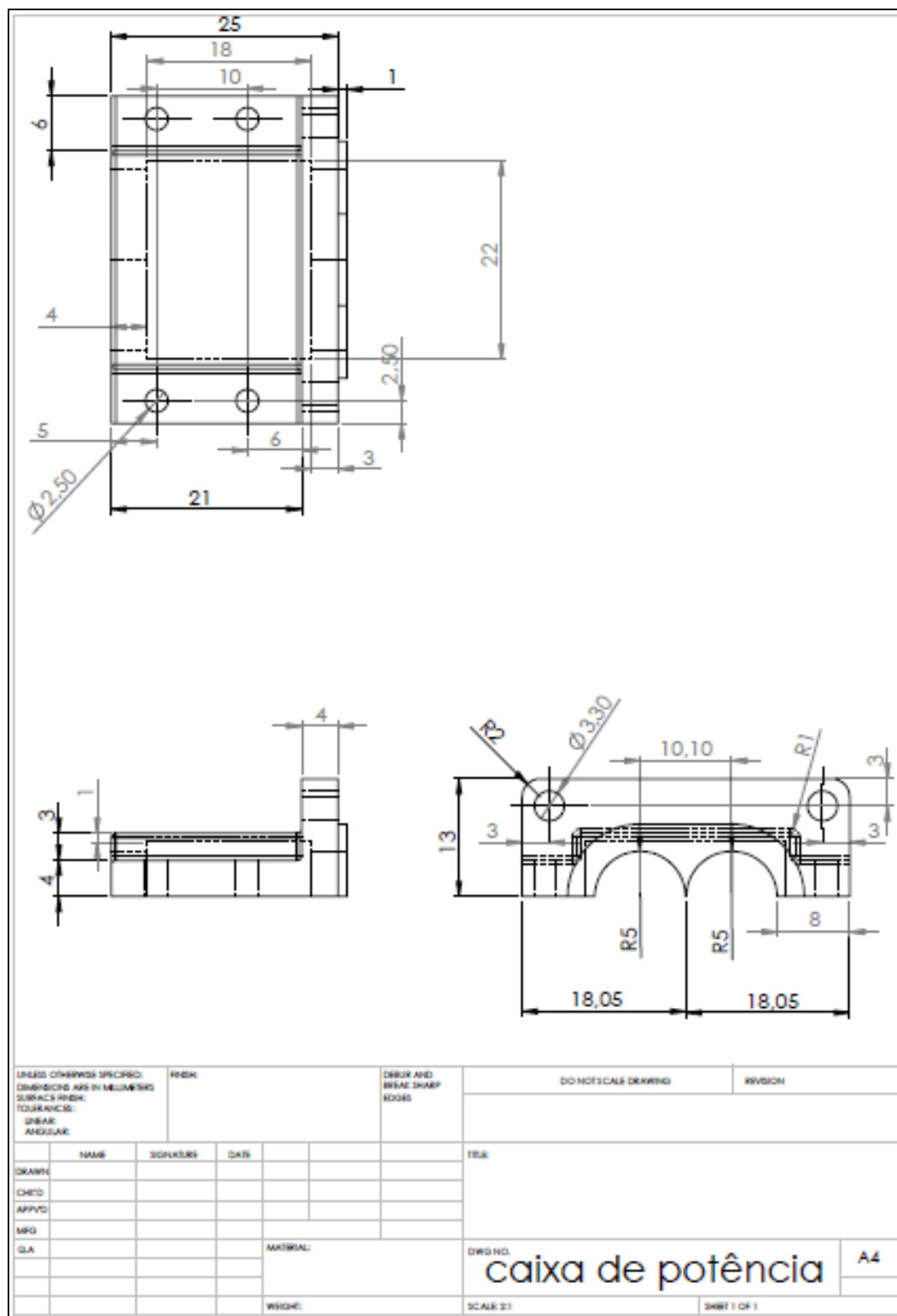
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES FINISH: TOURNAISSAGE: LINEAR ANGULAIRE				FINISH		DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
		NAME		SIGNATURE		DATE				TRUE	
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MFG											
Q.A.						MATERIAL:		DWG NO.		cilindro final	
										A4	
						WEIGHT:		SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	

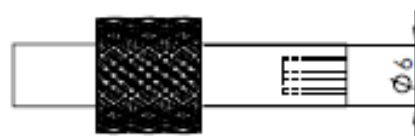
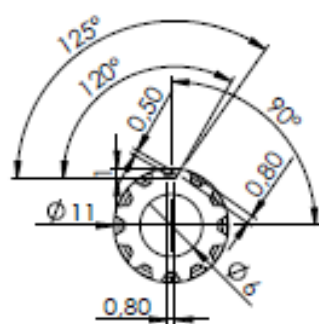


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES FINISH: TOUCH FINISH: UNLESS ANGULAR				FINISH		DRILL AND REAM SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TICK			
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MFG											
Q.A.				MATERIAL:		DWG NO.		cabeça extrusão			A4
				WEIGHT:		SCALE 2:1		SHEET 1 OF 1			

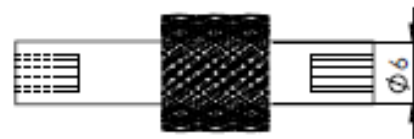


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: UNLESS INDICATED				FINISH		DRILL AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		TITLE			
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MFG											
Q.A.						MATERIAL:		DWG NO. fieira A4			
						Welds:		SCALE: 1 OF 1			

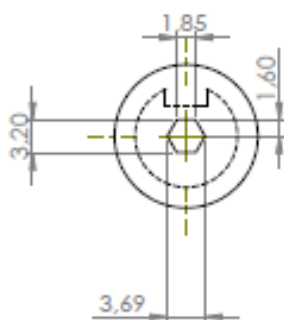
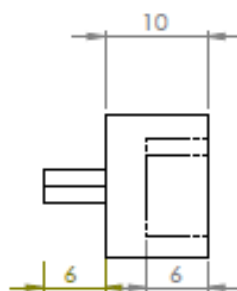
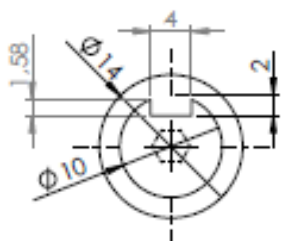




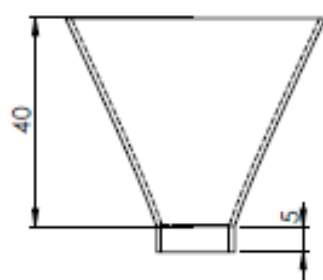
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH: AS SUPPLIED				FINISH		DRILL AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		TRUE			
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MFG											
QA						MATERIAL:		DWG NO.		A4	
								Engrenagem rel veio			
						WEIGHT:		SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1	



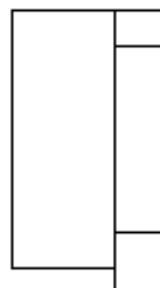
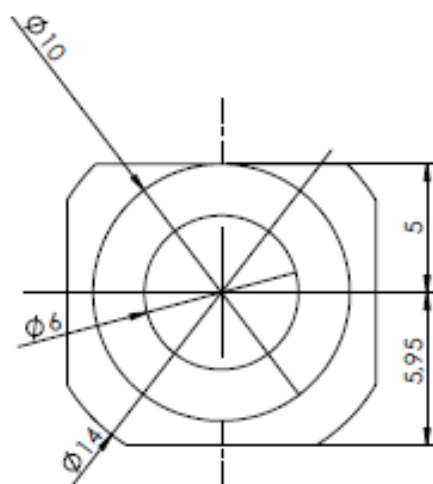
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES FINISH: UNLESS ANGULAR				FINISH		DRILL AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TICK			
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MRG											
QA						MATERIAL:		DWG NO.		A4	
								Engrenagem contrarela veio			
						WEIGHT:		SCALE 2:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: DRAWT ANGULAR		RISK		DRAW AND BRACE SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
DRAWN		NAME	SIGNATURE	DATE		TRUE	
CHECKED							
APPROVED							
MFG							
DATE		MATERIAL				FINISH	




UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACES FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:				FINISH		DRESS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME		SIGNATURE		DATE				TITLE			
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MFG											
GLA						MATERIAL:		DWG NO.		Tremonha	
										A4	
								SCALE: 1:1		SHEET 1 OF 1	



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: SHEAR: ANGULAR:				FINISH		DRILL AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME				SIGNATURE		DATE		TRUE			
DRAWN											
CHECKED											
APPROVED											
MRG											
GLA						MATERIAL:		DWG NO. casquilho A4			
						WEIGHT:		SCALE(S) SHEET 1 OF 1			

ANEXO III – Fichas técnicas dos materiais usados na maquinagem dos componentes



UNIVERSAL AFIR
Aços Especiais e Ferramentas, S.A.

Representante exclusivo em Portugal dos aços especiais Bohler

Marca: Universal 160

Nº de material: 2.0940


Perfis Disponíveis:

Estado de fornecimento:

Aplicações: Liga de elevada resistência ao desgaste e à deformação sob cargas elevadas. Aplicações na Indústria dos moldes, trabalhos públicos, cunhos e cortantes, siderurgia, etc.

Categoria: Bronzes Especiais

Cores de Identificação:



Normas:

Euronorma EN	AISI	SS	AFNOR	DIN	ASTM
			UA10N	CuAl10Ni	C95500

Composição Química (%) (Resto Cu):

Sn	Pb	Zn	P	Al	Fe	Ni	Sb	Mn
<0,2	<0,05	<0,5		8,5 11,0	3,5 5,5	4,0 6,5		<3,0

Características Mecânicas:

ρ Kg/dm ³	Rm N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	A5 (%)	HB 10/1000
7,6	700	300	13	160

Características Físicas:

C.Térmica W/m.K	C.Elect % IACS		Exp. Térmica 10-6.K	
60	4	6	17,0	19,0

Parâmetros de Utilização:

Vel. Linear adm. M/s	Carga média MPa
1,5	90

Aluminium Alloy 5083 - 'O' - H111 Sheet and Plate



SPECIFICATIONS

Commercial	5083
EN	5083

Aluminium 5083 is known for exceptional performance in extreme environments. 5083 is highly resistant to attack by both seawater and industrial chemical environments.

Alloy 5083 also retains exceptional strength after welding. It has the highest strength of the non-heat treatable alloys but is not recommended for use in temperatures in excess of 65°C.

Applications

Alloy 5083 is typically used in:

- ~ Shipbuilding
- ~ Rail cars
- ~ Vehicle bodies
- ~ Tip truck bodies
- ~ Mine skips and cages
- ~ Pressure vessels

Mechanical Properties shown are for O/H111 temper

CHEMICAL COMPOSITION

BS EN 573-3:2009
Alloy 5083

Element	% Present
Magnesium (Mg)	4.00 - 4.90
Manganese (Mn)	0.40 - 1.00
Iron (Fe)	0.40 Typical
Silicon (Si)	0.0 - 0.40
Titanium (Ti)	0.05 - 0.25
Chromium (Cr)	0.05 - 0.25
Copper (Cu)	0.10 Typical
Others (Total)	0.0 - 0.15
Zinc (Zn)	0.0 - 0.10
Other (Each)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al)	Balance

ALLOY DESIGNATIONS

Alloy 5083 corresponds to the following standard designations and specifications *but may not be a direct equivalent*:

GM41
A95083
AIMG4.5Mn
Al Mg4.5 Mn0.7

TEMPER TYPES

The most common tempers for 5083 aluminium are:

- O - Soft
- H111 - Some work hardening imparted by shaping processes but less than required for H11 temper
- H32 - Work hardened by rolling then stabilised by low-temperature heat treatment to quarter hard

SUPPLIED FORMS

- Plate
- Sheet

GENERIC PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value
Density	2.65 g/cm ³
Melting Point	570 °C
Thermal Expansion	25 x10 ⁻⁶ /K
Modulus of Elasticity	72 GPa
Thermal Conductivity	121 W/m.K
Electrical Resistivity	0.058 x10 ⁻⁶ Ω .m

MECHANICAL PROPERTIES

BS EN 485-2:2008
Sheet
0.2 - 6.3mm Thick

Property	Value
Proof Stress	125 Min MPa
Tensile Strength	275 - 350 MPa
Hardness Brinell	75 HB

Properties above are for material in the Soft O/H111 condition

Marca: (1.2738)

Nº de material: (1.2738)

Perfis Disponíveis: -

Estado de fornecimento: TRATADO

Aplicações: Moldes de injeção de plástico que exijam melhor maquinabilidade, fiabilidade, condutibilidade térmica e soldabilidade que o 1.2738.

Categoria: Aços de Construção - Ligados

Cores de Identificação: Laranja - Vermelho - Laranja



Normas:

Euronorma EN	AISI	AFNOR	DIN	Werk. Nº
	(P20)		(40 CrMnNiMo 8-6-4)	(1.2738)

Composição Química (%):

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Outros
0,25	0,12	1,25	1,75	0,45	≤ 1,00			S ≤ 0,02 P ≤ 0,02

Características Mecânicas:

Dureza (HB) Máx.	Rm N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	A (%) Lo+Sdo
290/330			

Forjamento e Tratamento Térmico:

Forjamento	Recozimento	Redução de Tensões	Cementação	Têmpera	Meio de Arrefecimento	Revenido

Marca: BOZD

Nº de material: 1.6582

Perfis Disponíveis: ●

Estado de fornecimento: TRATADO (b)

Aplicações: Semi-eixos, veios de torção e flexão, rodas dentadas, sem-fins, cavilhas, parafusos, porcas e pernos.

Categoria: Aços de Construção - Ligados

Cores de Identificação: Laranja



Normas:

Euronorma EN	AISI	AFNOR	DIN	Werk. Nº
34 CrNiMo 6	4337	35 NCD 6	34 CrNiMo 6	1.6582

Composição Química (%):

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Outros
0,34	≤ 0,40	0,65	1,50	0,22	1,50			

Características Mecânicas:

Dureza (HB) Máx.	Rm N/mm ²	Rp 0,2 N/mm ²	A (%) Lo+Sdo
240/405	≥ 82	≥ 61	≥ 9

Forjamento e Tratamento Térmico:

Forjamento	Recozimento	Redução de Tensões	Cementação	Têmpera	Meio de Arrefecimento	Revenido
	650 - 700 850 - 880 ■	550 - 600		830 - 860	1 2 3 4	180 - 660

ANEXO IV – Fichas técnicas dos materiais poliméricos utilizados para fase experimental

Borealis PE BS2581 Polietileno de Alta Densidade Borealis AG		PROSPECTOR® www.ulprospector.com
Technical Data		
Descrição do Produto Borealis PE BS2581 é um Polietileno de Alta Densidade produto, pode ser processado por extrusão ou moldagem por sopro e está disponível em África & Oriente Médio, América do Norte, América Latina, Ásia/Pacífico, ou Europa. Aplicações de Borealis PE BS2581 incluem aplicações domésticas, aplicações industriais, contêineres e garrafas.		
Características incluem: • Alta Rigidez • Alto ESCR (Resistente Estresse de Fendas)		
Considerações Gerais		
Status do Material	• Comercial: Ativo	
Literatura 1	• Technical Datasheet (English)	
UL Yellow Card 2	• E108112-218617	
Buscar UL Yellow Card	• Borealis AG	
Disponibilidade	• África & Oriente Médio • América do Norte	• América Latina • Ásia/Pacífico • Europa
Características	• Alta Dureza	• Alto ESCR (Resist. Estresse a Fendas.)
Usos	• Aplicações Industriais • Contêineres	• Garrafas • Produtos de Limpeza doméstica
Formas	• Pellets	
Método de Processamento	• Extrusão	• Moldagem por Sopro
Físicas	Valor Típico	Unidade Método
Densidade	0,958 g/cm³	ISO 1183
Índice de Fluidez		ISO 1133
190°C/2,16 kg	0,30 g/10 min	
190°C/21,6 kg	28 g/10 min	
190°C/5,0 kg	1,3 g/10 min	
Resistência a quebra por tensão ambiental, ESCR		ASTM D1693A
Antiarraio a 10%, F50	100 hr	
Mecânicas	Valor Típico	Unidade Método
Módulo de Tensão	1300 MPa	ISO 527-2/1
Esforço de tensão (Limite de elasticidade)	29,0 MPa	ISO 527-2/50
Deformação por tensão		ISO 527-2/50
Limite de elasticidade	8,0 %	
Módulo de Flexão 4	1400 MPa	ISO 178
Dureza	Valor Típico	Unidade Método
Dureza Shore (D Escala)	65	ISO 868
Térmicas	Valor Típico	Unidade Método
Temperatura de deflexão do calor		ISO 75-2/B
0,45 MPa, Unannealed	80,0 °C	
Extrusão	Valor Típico	Unidade
Temp. da zona 1 do cilindro	170 para 190 °C	
Temp. da zona 2 do cilindro	170 para 190 °C	
Temp. da zona 3 do cilindro	170 para 190 °C	
Temp. da zona 4 do cilindro	170 para 190 °C	
Temp. da zona 5 do cilindro	170 para 190 °C	
Temperatura de Massa	170 para 200 °C	
Temperatura da matriz	175 para 190 °C	

1/3



UL and the UL logo are trademarks of UL LLC © 2014. All Rights Reserved.
 UL Prospector | 800-776-6080 or 307-740-9227 | www.ulprospector.com

Documento Criado: segunda-feira, 8 de Setembro de 2014
 Adicionado ao Prospector: Janeiro de 2005
 Última Atualização: 27-09-2014

As informações apresentadas neste guia foram adquiridas pela UL Prospector do produtor do material. A UL Prospector não substancia as afirmações para assegurar a exatidão desses dados. Entretanto, a UL Prospector não assume qualquer responsabilidade pelos valores dos dados e recomenda que ao final de seleção dos materiais, pontos de dados sejam validados com o fornecedor do material.

Technical Data

Descrição do Produto

Lupolen 2426 H é um Polietileno de Baixa Densidade produto enchido com 0,10% enchimento de sílica, pode ser processado por filme plano ou filme soprado e está disponível em África & Oriente Médio, Ásia/Pacífico, ou Europa. Aplicações de Lupolen 2426 H incluem película, embalagem, embalagem e sacolas/torres.

Características Incluem:

- Deslizante
- Antibloqueador
- Boa Estética
- Boa Processabilidade

Considerações Gerais

Status do Material	• Comercial: Ativo		
Literatura ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Processing - Mold Shrink (English) • Processing - PE Films (English) • Processing - Polyolefin Injection Molding Guide (English) • Technical Datasheet (English) 		
Buscar UL Yellow Card	<ul style="list-style-type: none"> • LyondellBasell Industries • Lupolen 		
Disponibilidade	• África & Oriente Médio	• Ásia/Pacífico	• Europa
Carga/Reforço	• Enchimento de Sílica, 0,10% Carga por Peso		
Aditivo	• Antibloqueio	• Deslizamento	• Deslizamento Erucamida (500 ppm)
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Antibloqueio • Baixa Fricção 	<ul style="list-style-type: none"> • Boa processabilidade • Deslizamento 	• Ópticos
Usos	<ul style="list-style-type: none"> • Bolsas • Embalagens de Alimentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Filme • Filme Plano 	• Invólucros que Encolhem
Formas	• Pellets		
Método de Processamento	• Filme Plano	• Filme Soprado	

Físicas	Valor Típico	Unidade	Método
Densidade	0,924	g/cm³	ISO 1183
Índice de Fluidez (190°C/2, 16 kg)	1,9	g/10 min	ISO 1133
Mecânicas	Valor Típico	Unidade	Método
Módulo de Tensão	260	MPa	ISO 527-2
Esforço de tensão (Limite de elasticidade)	11,0	MPa	ISO 527-2
Coefficiente de fricção	<0,20		ISO 8295
Filmes	Valor Típico	Unidade	Método
Espessura do filme	50	µm	
Espessura de Filme Disponível para Compra	20-60	µm	
Tensão			ISO 527-3
DM : 50 µm, Filme Tubular	25,0	MPa	
DT : 50 µm, Filme Tubular	21,0	MPa	
Alongamento			ISO 527-3
DM : Na Ruptura, 50 µm, Filme Tubular	250	%	
DT : Na Ruptura, 50 µm, Filme Tubular	600	%	
Resistência ao Impacto			ASTM D1709
50 µm, Filme Tubular	110	g	
Térmicas	Valor Típico	Unidade	Método
Temperatura de Amolecimento Vicat	94,0	°C	ISO 306/A50
Temperatura de fusão (DSC)	111	°C	ISO 3146

1/3



UL and the UL logo are trademarks of UL LLC © 2014. All Rights Reserved.
 UL Prospector | 800-785-6980 or 307-740-9227 | www.ulprospector.com

Documento Criado: segunda-feira, 6 de Setembro de 2014
 Adicionado ao Prospector: Maio de 2000
 Última Atualização: 06-02-2012

As informações apresentadas nesta planilha foram adquiridas pela UL Prospector do produtor do material. A UL Prospector faz substanciais esforços para assegurar a exatidão destes dados. Entretanto, a UL Prospector não assume qualquer responsabilidade pelos valores dos dados e recomenda que ao final da seleção dos materiais, pontos de dados sejam validados com o fornecedor do material.